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

MEJORA EN TIEMPOS DE CICLO DE CAMIONES UTILIZANDO SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA

Valeria Jesús Jorquera Olivares

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

Profesor Guía
Fabián Manríquez

Profesional Supervisor
Andrés Mujica

2024
Santiago, Chile.

Agradecimientos

Quisiera aprovechar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, me han ayudado a completar este proceso.

En primer lugar, quiero agradecer de todo corazón a mi papá, mamá y hermana. Ellos son, sin duda, lo más valioso que tengo en la vida y mi fuerza impulsora. Han sido el pilar fundamental en este camino, y sin su amor, paciencia y apoyo, no lo hubiese logrado. Gracias por estar siempre conmigo.

Un agradecimiento muy especial es para mi perrita Samy, quien estuvo a mi lado cada día y noche de estudio, brindándome su cariño y amor incondicional. En los momentos más difíciles era mi lugar seguro, y en los momentos de alegría, su presencia los hacía aún más especiales.

A mi pareja, Pablo, quiero expresarle mi agradecimiento por su apoyo durante todo este proceso universitario. Su paciencia, comprensión y palabras de aliento fueron fundamentales para mantenerme motivada, especialmente en los momentos difíciles.

También quiero agradecer a todos mis amigos, por los momentos compartidos, por las risas y el apoyo mutuo. Hicieron de esta etapa algo inolvidable, y llevaré con cariño cada recuerdo.

Finalmente, quiero agradecer a Andrés Mujica y Adeline Delonca, quienes con su conocimiento, orientación y consejos me guiaron a lo largo de este estudio. Gracias por su tiempo y dedicación

Resumen ejecutivo

En la minería cielo abierto una de las actividades más relevantes es el transporte, debido a su impacto significativo en el tiempo total empleado y en el costo total del proceso minero.

El problema identificado en la faena en estudio se centra en la congestión y en los tiempos de ciclo elevados que afectan la eficiencia del transporte de material, incrementando los costos y reduciendo la productividad. Por lo tanto, la propuesta de trabajo de esta memoria consiste en la utilización del simulador estocástico de *HaulSim* para modelar y optimizar el proceso de transporte dentro de la mina, con el objetivo de reducir los tiempos de ciclo.

La metodología empleada incluyó la recopilación y análisis de datos reales provenientes de una mina rajo abierto. Estos datos incluyen información sobre los tiempos de ciclo reales, las rutas y la distribución de los equipos de carguío y transporte. Tras la construcción del modelo digital de la mina en *HaulSim*, se lleva a cabo una simulación inicial que permite identificar los principales problemas de congestión que impactan en los tiempos de ciclo. A partir de estos hallazgos, se propusieron estrategias de mejora, tales como la reducción del número de camiones en ciertas fases y la reconfiguración de rutas. Cada una de las mejoras fue implementada y evaluada en la simulación, cuyos resultados demostraron que las mejoras propuestas lograron reducir los tiempos de ciclo estocásticos. Las fases que mostraron mayores reducciones en los tiempos de ciclo fueron: fase 5 con una disminución de 15,3 min, fase 6 con 6,4 min, fase 1 con 3,9 min y fase 2 con 3 min, lo que condujo a un aumento de la productividad de estas fases en 13,34 ktpd. Considerando todas las fases se tiene que la productividad aumentó 23,0 ktpd lo que corresponde a una diferencia relativa del 3% con respecto a la situación inicial.

El uso del simulador estocástico permitió realizar estos análisis de manera controlada, sin necesidad de interrumpir las operaciones reales, lo que destaca su valor como herramienta para la toma de decisiones en la planificación minera.

Este trabajo no solo valida la utilidad de *HaulSim* como una herramienta eficaz para la simulación de operaciones mineras, sino que también resalta la importancia de la simulación estocástica en la gestión de las incertidumbres y variabilidades propias del proceso minero.

Abstract

In open pit mining, one of the most relevant activities is transportation, due to its significant impact on the total time spent and the total cost of the mining process.

The problem identified at the site under study focuses on congestion and high cycle times that affect the efficiency of material transport, increasing costs and reducing productivity. Therefore, the work proposal of this report consists of using the HaulSim stochastic simulator to model and optimize the transportation process within the mine, with the objective of reducing cycle times.

The methodology employed included the collection and analysis of real data from an open pit mine. This data included information on actual cycle times, routes and distribution of loading and haulage equipment. After building the digital model of the mine in HaulSim, an initial simulation is carried out to identify the main congestion issues impacting cycle times. Based on these findings, improvement strategies were proposed, such as reducing the number of trucks in certain phases and reconfiguring routes. Each of the improvements was implemented and evaluated in the simulation, the results of which showed that the proposed improvements were successful in reducing stochastic cycle times. The phases that showed the greatest reductions in cycle times were: phase 5 with a decrease of 15.3 min, phase 6 with 6.4 min, phase 1 with 3.9 min and phase 2 with 3 min, which led to an increase in the productivity of these phases by 13.34 ktpd. Considering all phases, productivity increased by 23.0 ktpd, which corresponds to a relative difference of 3% with respect to the initial situation.

The use of the stochastic simulator allowed performing these analyses in a controlled manner, without interrupting the real operations, which highlights its value as a tool for decision making in mine planning.

This work not only validates the usefulness of HaulSim as an effective tool for the simulation of mining operations, but also highlights the importance of stochastic simulation in the management of uncertainties and variabilities inherent to the mining process.

Tabla de contenido

Agradecimientos i
Resumen ejecutivo ii
Abstract iii
1. Introducción 1
1.1. Objetivo general 2
1.2. Objetivos específicos 2
1.3. Alcances 2
2. Marco teórico 4
2.1. Minería a cielo abierto 4
2.2. Operaciones unitarias de explotación 5
2.3. Tiempo de ciclo de transporte 8
2.4. Modelo de usos de tiempo 11
2.5. Índices operacionales 13
2.6. Simulación 14
3. Metodología 19
4. Desarrollo del estudio 22
4.1. Recopilación de datos 22
4.2. Construcción modelo de simulación situación inicial 24
4.3. Calibración de la simulación 34
4.4. Simulación situación inicial 36
4.5. Brechas situación inicial 37
4.6. Propuestas de mejoras 39
5. Resultado simulación con las propuestas de mejoras implementadas 46
6. Conclusiones y recomendaciones 51
6.1. Recomendaciones 52
7. Referencias 53
8. Anexos 54

Índice de tablas

Tabla 4.1. Factor de llenado de los equipos de carguío. 25
Tabla 4.2. Equipos de carguío según fase. 29
Tabla 4.4. Situación inicial equipos de transporte según origen. 29
Tabla 4.5. Velocidades por tramo. 35
Tabla 4.6. Tiempos de ciclo simulación situación inicial. 36
Tabla 4.7. Propuesta equipos de transporte según origen. 40
Tabla 5.1. Tiempos de ciclo finales. 46
Tabla 4.3. Parámetros operaciones de los equipos de transporte. 49
Tabla 5.2. Productividad inicial y final. 49

Índice de figuras

Figura 2.1. Mina a cielo abierto (elaboración propia). 4
Figura 2.2. Distribución de costo mina por unidad operativa (Martinez E. , 2019). 6
Figura 2.3. Equipos de transporte mineros (Australian Government, 2010). 7
Figura 2.4. Ciclo de camión en minería a cielo abierto (elaboración propia). 9
Figura 2.5. Modelo de uso de tiempos ASARCO (GMG, 2020). 11
Figura 2.6. Interfaz de HaulSim (RPM Global, 2023). 16
Figura 2.7. Curva Rimpull de los equipos utilizados en la faena de estudio (extraído del software HaulSim). 18
Figura 2.8. Curva Retard de los equipos utilizados en la faena de estudio (extraído del software HaulSim). 18
Figura 3.1. Metodología de trabajo (elaboración propia). 19
Figura 4.1. Imagen satelital de la mina en estudio. 23
Figura 4.2 Topografía de la mina en estudio. 23
Figura 4.3. Ubicaciones de la mina. 24
Figura 4.4. Topografía ingresada a HaulSim. 25
Figura 4.5. Orígenes en HaulSim. 26
Figura 4.6. Destinos en HaulSim. 26
Figura 4.7. Auxiliares en HaulSim. 26
Figura 4.8. Red de rutas ingresada en HaulSim. 27
Figura 4.9. Reglas de tráfico ingresadas en HaulSim. 27
Figura 4.10. Regla de ruta unidireccional en HaulSim. 28
Figura 4.11. Configuración equipos de carguío. 28
Figura 4.12. Grupo de equipos de carguío. 30
Figura 4.13.Grupo de equipos de transporte. 31
Figura 4.14. Asignación de los grupos. 31
Figura 4.15. Tareas según plan. 32
Figura 4.16. Paradas programadas de equipos de transporte. 32
Figura 4.17. Ejecución de la simulación. 33
Figura 4.18. Plantilla de excel para obtención de tiempos de ciclo estocásticos. 34
Figura 4.19. Mapa de velocidades sectorizado. 35
Figura 4.20. Diferencia absoluta y relativa. 37
Figura 4.21. Brechas de tiempo mejorables. 38
Figura 4.22. Promedio por fase de las brechas de tiempo mejorables. 39
Figura 4.23. Cantidad de camiones según tonelaje. 40
Figura 4.24. Situación inicial del recorrido fase 6 a botaderos. 41
Figura 4.25. Propuesta recorrido fase 6 a botaderos. 41
Figura 4.26. Situación inicial del recorrido fase 5 a chancadores. 42
Figura 4.27. Propuesta recorrido fase 5 a chancadores. 43
Figura 4.28. Intersección fase 1. 43

Figura 4.29. Cruce fase 2 y fase 3. 44
Figura 5.1. Comparación tiempos de ciclo estocásticos, situación inicial y final. 47
Figura 5.2 Diferencia ganada de tiempo de ciclo estocástico. 47
Figura 5.3. Diferencia relativa tiempos de ciclo estocásticos. 48
Figura 5.4. Productividad ganada una vez implementadas las mejoras. 50
Figura 8.1. Tiempos de ciclo Fase 1 (inicial). 54
Figura 8.2. Tiempos de ciclo Fases 2, 3 y 4 (inicial). 54
Figura 8.3. Tiempos de ciclo Fase 5 (inicial). 54
Figura 8.4.Tiempos de ciclo Fase 6 (inicial). 55
Figura 8.5. Tiempos de ciclo Stocks (inicial). 55
Figura 8.6.Tiempos de ciclo Fase 1 (final). 55
Figura 8.7.Tiempos de ciclo Fases 2, 3 y 4 (final). 56
Figura 8.8.Tiempos de ciclo Fase 5 (final). 56
Figura 8.9.Tiempos de ciclo Fase 6 (final). 56
Figura 8.10.Tiempos de ciclo Stocks (final). 57

Índice de ecuaciones

Ecuación (1)..... 11
Ecuación (2)..... 13
Ecuación (3)..... 13
Ecuación (4)..... 14
Ecuación (5)..... 14
Ecuación (6)..... 49

1. Introducción

La minería a cielo abierto es una de las técnicas de explotación más utilizadas en la industria minera debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de material y operar con equipos de gran envergadura. Sin embargo, a medida que las operaciones avanzan en profundidad, la productividad en la minería a cielo abierto tiende a disminuir. Esto resalta la importancia de mejorar la eficiencia y productividad de los equipos para garantizar el cumplimiento de los objetivos de producción.

Uno de los principales desafíos operativos en este contexto es la gestión eficiente del transporte dentro de la mina, un proceso que no solo es uno de los más costosos, representando alrededor del 43 % de los costos, sino también uno de los más susceptibles a las ineficiencias (Martinez E. , 2019). Factores como la congestión en las rutas, el dimensionamiento inadecuado de la flota y las limitaciones impuestas por la topografía del terreno complican la planificación y ejecución del transporte.

El tiempo de ciclo de transporte, que se refiere al período necesario para que los equipos de transporte sean cargados, transporten el material a su destino y regresen al punto de origen, impacta en la planificación a corto plazo. Una estimación incorrecta del tiempo de ciclo requerido para que un camión complete la operación de carguío y transporte entre dos puntos afecta directamente el cumplimiento de los objetivos de producción y la gestión de costos en la mina.

El análisis del sistema de transporte en la minería a cielo abierto es particularmente complejo debido a la incertidumbre y las interacciones entre los equipos. Los métodos convencionales, también conocidos como métodos determinísticos, asumen que las variables operativas son constantes y predecibles. Sin embargo, estos métodos no son representativos de la realidad operativa en la minería, ya que no consideran la naturaleza estocástica del sistema, donde factores como las fallas aleatorias de los equipos introducen variabilidad y aleatoriedad en las operaciones.

A diferencia del enfoque determinístico, el análisis estocástico permite modelar y simular la variabilidad propia de los procesos mineros, proporcionando una representación más realista y precisa del comportamiento del sistema. En este contexto, el uso de la simulación estocástica en la minería a cielo abierto ofrece una ventaja significativa, ya que permite la evaluación de múltiples escenarios y la identificación de soluciones óptimas sin la necesidad de realizar costosos y riesgosos experimentos en la realidad.

La presente memoria propone utilizar la simulación estocástica, a través del *software HaulSim*, para optimizar los tiempos de ciclo de los equipos de transporte de una mina a cielo abierto de la industria nacional. La metodología propuesta no solo busca mejorar la eficiencia en los tiempos de ciclo, sino también establecer un marco de trabajo replicable en otros contextos mineros.

1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es mejorar los tiempos de ciclo de los camiones utilizando un simulador estocástico.

1.2. Objetivos específicos

- Modelar el caso de un rajo abierto en el simulador *HaulSim*.
- Identificar dónde se generan los principales problemas de congestión.
- Determinar las mejoras e implementarlas en el modelo.
- Verificar que el modelo del tiempo de ciclo es compatible con los tiempos de ciclo existentes.

1.3. Alcances

Esta memoria de título se fundamenta en datos obtenidos de una mina a cielo abierto de la industria nacional, cuyo nombre se mantiene en reserva.

Para este trabajo de memoria se tienen las siguientes consideraciones:

- En el modelo de simulación se contemplan palas y camiones, no se incluyen equipos auxiliares.
- La operación cuenta con una flota de 166 camiones de alta capacidad, que incluyen los modelos Komatsu 960 E, de la clase 326,59 ton; Komatsu 980 E-4, de la clase 369,41 ton; Caterpillar 797 F y Caterpillar 797 B, de la clase 363 ton.
- La flota de palas está compuesta por 20 unidades, que incluyen los modelos P&H 4100 XPC, Komatsu PC8000-6 y Caterpillar 994 K.
- El manejo de materiales y procesos posterior al chancado no forma parte del estudio, al igual que el ingreso de insumos y carga de combustible de los equipos.
- Los chancadores no presentan fallas en la simulación.
- No se consideran las fallas no programadas.
- No se consideran interacciones de los CAEX con equipos tripulados.
- No se consideran impactos en la operación por condiciones climáticas.

- Los resultados obtenidos están sujetos a las pendientes que indicaban las topografías consideradas para realizar los modelos de simulación.
- No se realiza una evaluación con enfoque económico de la aplicación de esta metodología.
- La simulación tiene una duración de 24 h.
- Cada simulación ejecuta 10 escenarios, de los cuales se escoge el que transporta la mayor cantidad de tonelaje. La cantidad de escenarios fue determinada debido a la capacidad del computador. Este proceso se realiza 10 veces y se utiliza el promedio de estos tiempos.

2. Marco teórico

El propósito de este capítulo es contextualizar los conceptos claves para comprender el trabajo realizado, profundizando en el ámbito de la minería a rajo abierto.

2.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto son aquellas explotaciones mineras cuya actividad se desarrolla en la superficie del terreno y se caracterizan por su alto volumen de producción en etapa de régimen (Nube Minera, 2022). Por lo general, suelen tener forma cónica, aunque esto varía dependiendo de la configuración del yacimiento. En la Figura 2.1 se aprecia un yacimiento cielo abierto con forma cónica.

Figura 2.1. Mina a cielo abierto (elaboración propia).

Una de las ventajas de la minería a cielo abierto es que permite el uso de equipos de gran envergadura, ya que no se ven limitados por el espacio, a diferencia de las minas subterráneas. Esta capacidad de operar con maquinarias más grandes puede resultar en una productividad mayor y menores costos operativos por unidad de mineral extraído. No obstante, su operación puede estar sujeta a restricciones climáticas, como ocurre en las minas ubicadas en la alta cordillera o en la zona central del país.

El método de extracción a cielo abierto se destaca por su bajo costo operativo y su moderada selectividad, ya que ofrece la flexibilidad de decidir si el mineral extraído se somete a procesamiento, se envía a áreas de acopio (stocks) o se descarga en botaderos (Henríquez, 2019).

El proceso de extracción de mineral comienza con la realización de perforaciones, a las cuales se les coloca explosivos y se ejecuta la tronadura, este proceso es esencial para fragmentar la roca en tamaños manejables que faciliten su posterior manipulación y transporte. Una vez realizada la tronadura, se procede con el retiro del material fragmentado, donde equipos de carguío recogen el material suelto y lo descargan en la tolva de los equipos de transporte.

La ruta de los equipos de transporte está diseñada en función de la carga transportada y las condiciones del terreno, garantizando la seguridad y eficiencia del proceso.

El destino depende de la carga transportada (Aste, 2012):

- En el caso que el equipo transporte mineral de buena ley, su destino es la planta de chancado. Allí, el mineral pasa por diferentes etapas de reducción de tamaño, lo que facilita su posterior procesamiento y mejora la recuperación de los metales valiosos.
- En cambio, si la carga consiste en mineral de baja ley se lleva a stocks, los cuales son zonas de acopio de mineral extraído.
- En el caso que transporte material inerte o estéril, es decir, mineral con ley inferior a la ley crítica, el camión se dirige al botadero designado.

El principal objetivo económico en la minería a cielo abierto es extraer la cantidad mínima de material y maximizar la inversión, realizando el procesamiento al mineral de mayor valor en el mercado y evitando la manipulación y el movimiento innecesario de grandes volúmenes de material estéril. Esto se logra mediante la implementación de estrategias eficientes y tecnologías avanzadas que permiten optimizar los procesos de extracción, transporte y procesamiento del mineral.

2.2. Operaciones unitarias de explotación

Cuando las operaciones unitarias se ejecutan en una secuencia específica, habilitan la explotación y desarrollo de una mina. Este trabajo se centra en aquellas operaciones relacionadas con la explotación y extracción de material, las cuales son: perforación, tronadura, carguío y transporte. Cuyos costos generalmente se distribuyen como se aprecia en la Figura 2.2.

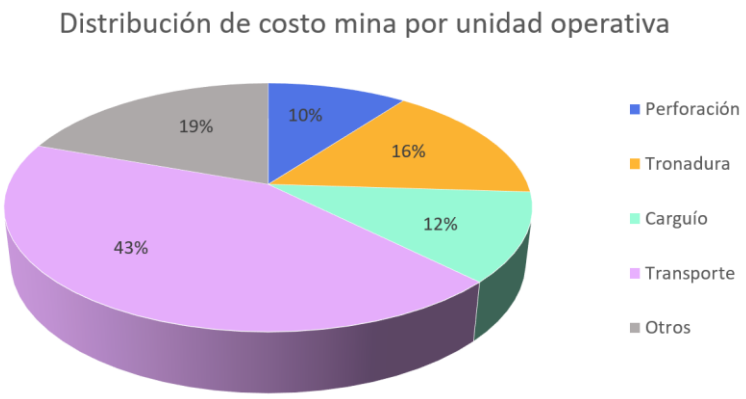


Figura 2.2. Distribución de costo mina por unidad operativa *(Martinez E. , 2019)*.

Como se observa en la figura anterior, las operaciones de carguío y transporte en conjunto representan un 55 % de los costos totales. Esto se debe a que ambas operaciones presentan gran cantidad de equipos los cuales se utilizan de manera prácticamente ininterrumpida y cuyo rendimiento productivo es relativamente bajo. En términos generales, estos costos suelen abarcar un rango que va desde el 45 % hasta el 65 % del costo total de la operación minera, es por esto la importancia de mantener un ambiente operativo óptimo para asegurar el máximo rendimiento de los equipos involucrados (Inacap, 2016).

A continuación, se presenta una breve descripción de las operaciones de perforación y tronadura, mientras que, las operaciones de carguío y transporte se definen y detallan a profundidad más adelante.

La perforación marca el inicio del proceso productivo en una operación minera, y su propósito es crear orificios en el macizo rocoso con una distribución y geometría apropiada (Sernageomin, 2018). Esta operación se lleva a cabo utilizando maquinaria especializada, como perforadoras y captadores de polvo. La elección de las perforadoras está estrechamente vinculada a las particularidades de la mina, abarcando sus aspectos físicos, geométricos y operativos. Una vez finalizada la perforación se procede a retirar la perforadora para que posteriormente los orificios sean cargados con material explosivo.

La tronadura es el proceso durante el cual se depositan explosivos en los pozos perforados, se establece la secuencia de detonaciones y se lleva a cabo la fragmentación de la roca por etapas, para que pueda ser manejada por los equipos mineros, por lo tanto, es el primer proceso de conminución que se aplica al material. Los fragmentos de roca resultantes son cargados y transportados a chancadores, stocks o botaderos (Portal Minero, 2006). Esta operación involucra la implementación principalmente de *blasters*, *loggers*, detonadores, explosivos, camiones fábrica y polvorín.

2.2.1. Carguío

El carguío consiste en retirar el material tronado de la frente y depositarlo en equipos de transporte. El inicio de este proceso se efectúa una vez finalizado el proceso de tronadura y luego de haber verificado que la operación se puede ejecutar de manera segura (se identifican tiros quedados, zonas de posibles derrumbes, entre otros). Luego los equipos de carguío se posicionan en el lugar de operación y extraen el material tronado para depositarlo en la tolva del equipo de transporte, esto requiere de un área de trabajo en el que ambos equipos puedan operar sin inconvenientes (González, 2017).

2.2.2. Transporte

La operación que genera mayor parte de los costos en la industria minera es el transporte, este costo transporte está definido principalmente por el consumo de combustible de los camiones, neumáticos y el mantenimiento constante de los equipos.

Los camiones desempeñan un papel fundamental en el traslado, tanto de mineral como de estéril, desde la zona de extracción hasta un destino definido por el plan minero (González, 2017). Su utilización se planifica de manera coordinada junto con otras maquinarias como excavadoras y palas, teniendo en cuenta la configuración del sitio minero y la capacidad de producción (Australian Government, 2010).

En la Figura 2.3 se observan dos equipos de transporte, uno vacío y otro cargado con material.

Figura 2.3. Equipos de transporte mineros *(Australian Government, 2010)***.**

2.3. Tiempo de ciclo de transporte

El ciclo de transporte se define como el procedimiento mediante el cual se realiza la transferencia de material desde un punto de origen hacia un destino. Este ciclo se conforma por distintas etapas que se repiten de manera continua durante el desarrollo de la operación y puede comenzar cuando el equipo de transporte es cargado por el equipo de carguío. Luego, el equipo de trasporte se desplaza a lo largo de una ruta predefinida hasta llegar a una zona de descarga específica, que puede ser un botadero, un área de almacenamiento o incluso un lugar donde se procese el material, como un chancador. Una vez que se ha completado la descarga en el destino, el equipo se prepara para volver a ser cargado, iniciando un nuevo ciclo de transporte. Cabe mencionar que, para la realización de carga y descarga, el equipo debe realizar una maniobra para su correcto posicionamiento, el cual se denomina aculatamiento (Ortiz J. , 2008).

Cada uno de los ciclos implica el traslado de una cantidad determinada de material hacia su destino final. La suma de todas estas descargas constituye la producción total de la mina, lo que refleja la eficiencia y productividad del proceso de transporte en la operación minera.

El tiempo de ciclo se mide en minutos y abarca todos los tiempos que demora en realizar cada una de las etapas. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las etapas:

1. **Tiempo de viaje vacío:** se considera desde el momento que el camión ha descargado todo el material y se dirige al frente de carguío.
2. **Tiempo de aculatamiento en carguío:** intervalo de tiempo que el operador maniobra el camión para posicionarse correctamente en el frente de carguío.
3. **Tiempo de carguío:** se considera desde el momento que la pala vierte el primer cucharon de material en la tolva del camión hasta que vierte el último cucharón.
4. **Tiempo de viaje cargado:** se considera desde que el camión inicia su marcha en la pala hasta que llega al destino, dependiendo de su material cargado.
5. **Tiempo de aculatamiento en destino:** intervalo de tiempo que el operador maniobra el camión para posicionarse correctamente en su destino
6. **Tiempo de descarga:** tiempo que demora el camión en descargar todo el material en su destino, desde que levanta la tolva hasta que la baja a su posición inicial.

En la Figura 2.4 se presenta el esquema de los tiempos mencionados anteriormente.

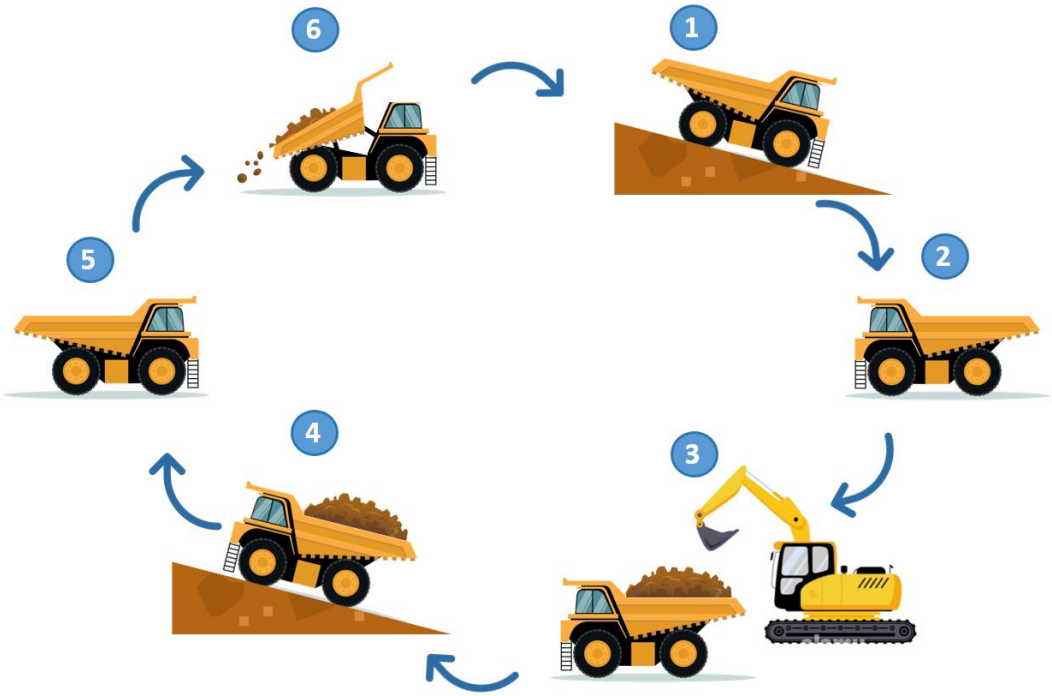


Figura 2.4. Ciclo de camión en minería a cielo abierto (elaboración propia).

La duración de este procedimiento puede extenderse por varios minutos. En operaciones mineras de gran envergadura, los tiempos de ciclo de transporte pueden sobrepasar los 30 min, y esta cifra tiende a incrementarse significativamente a medida que progresa el avance de los puntos de descarga y se profundiza el rajo.

Cabe mencionar que es un factor crucial en minería, ya que engloba una serie de parámetros, como la topografía, la resistencia a la rodadura, la fuerza de tracción de los equipos, las pendientes de los caminos, el nivel de congestión y las colas.

Para el análisis de este estudio se establecen cuatro tiempos de ciclo, los cuales se definen a continuación.

2.3.1. Tiempo de ciclo determinístico

El cálculo de los tiempos de ciclo determinísticos en *HaulSim* se realiza utilizando valores constantes para parámetros como los tiempos de carga, transporte, descarga y demoras. La sumatoria de estos tiempos define el ciclo determinístico. Para llevar a cabo este cálculo, es necesario ingresar una serie de datos específicos que se organizan en función del origen, recorrido y destino.

En el origen, que corresponde al frente de carguío, se deben proporcionar datos como el número de equipos de carguío, especificando sus modelos y capacidades, así como el tiempo simulado, que puede expresarse en términos de turnos u horas. Además, es fundamental ingresar el ciclo del equipo de carguío, el tiempo de demoras en minutos, el factor de llenado del equipo y el factor de acoplamiento.

Respecto al recorrido, se requiere información detallada sobre el número de segmentos de vía, la longitud de cada segmento, y las características de los equipos de transporte, como su número, modelo, peso vacío, y la carga real transportada. Asimismo, se debe incluir datos sobre la pendiente de cada segmento, la resistencia al rodamiento, las curvas rimpull y retard de cada modelo, la capacidad de los equipos en toneladas, las velocidades máximas y mínimas permitidas, y el tiempo de demoras.

Finalmente, en el destino, se deben registrar el tiempo de descarga del equipo de transporte y el tiempo de demoras, ambos medidos en minutos.

Es importante tener en cuenta que estos tiempos de ciclos están basados en la premisa de que el equipo en cuestión es el único realizando el recorrido, por lo tanto, no se considera la congestión. En consecuencia, estos tiempos sirven como cota inferior de los tiempos de ciclo que se pueden lograr. (He, Li, & Giua, 2016)

2.3.2. Tiempo de ciclo estocástico

El reporte que proporciona *HaulSim* contiene información sobre el movimiento de material en forma de un archivo CSV, el cual se procesa en Excel con el fin de calcular los tiempos de ciclo estocásticos. Estos tiempos de ciclo estocásticos tienen en cuenta el impacto de la flota y la interacción entre los equipos, lo que permite optimizar la producción al máximo (Proth & Xie, 1994). En consecuencia, estos tiempos se interpretan como "logrables" de acuerdo con las condiciones propuestas por la configuración del rajo y los *KPI* esperados para la flota

2.3.3. Tiempo de ciclo deseado o del plan

Se refiere al tiempo estimado o programado conforme a un plan previamente establecido por el equipo de planificación minera. Este tiempo es un *target* que se fija según lo simulado y factores específicos presentes en el terreno, como las dimensiones de las áreas de descarga y la geometría de caminos. En consecuencia, este es el tiempo que se busca alcanzar.

2.3.4. Tiempo de ciclo real

Los tiempos de ciclo reales son obtenidos mediante los datos *GPS* del camión proporcionados por la empresa minera. Estos son los tiempos que se pretende optimizar con el objetivo de mejorar los indicadores clave de desempeño (*KPIs*) de la compañía minera.

Generalmente la relación entre estos cuatro tiempos se establece de la Ecuación (1):

$$TC_{deterministico} < TC_{estocastico} \lesssim TC_{plan} \lesssim TC_{Real} \tag{1}$$

2.4. Modelo de usos de tiempo

Uno de los aspectos de mayor relevancia en la operación minera es la gestión eficiente de los equipos a lo largo del tiempo (GMG, 2020). Por lo tanto, se debe utilizar un sistema de categorización adecuado para estos equipos, con el fin de comprender su desempeño y detectar las principales áreas de ineficiencia en las operaciones.

El modelo de referencia para definir los tiempos de utilización de los equipos puede variar según cada empresa. Dentro de estas, destaca la norma *ASARCO* (American Smelting & Refinering Co) la cual es ampliamente adoptada por las compañías mineras, ver Figura 2.5.

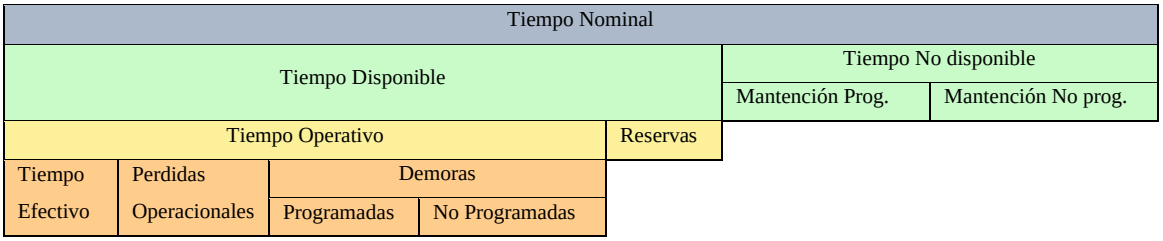


Figura 2.5. Modelo de uso de tiempos ASARCO *(GMG, 2020)***.**

Los conceptos de tiempos que se definen a continuación reflejan clasificaciones comunes que la industria minera ha adoptado a lo largo del tiempo.

- **Tiempo nominal:** es el tiempo total disponible, por lo tanto, representa las horas totales de cada turno de trabajo. En un día el tiempo nominal es de 24 horas.
- **Tiempo programado:** es el tiempo donde el equipo es esencial para alcanzar los objetivos del plan y se asigna a un trabajo específico.

- **Tiempo no programado:** es el tiempo donde el equipo no está programado ni asignado en el sistema.
- **Tiempo no disponible:** es el tiempo donde los equipos están inactivos, ya que están en mantención.
- **Tiempo disponible:** es el tiempo donde el equipo es requerido y está en condiciones de realizar su función prevista. Este tiempo se subdivide en tiempo operativo y tiempo en reserva.
- **Tiempo en reserva:** es el tiempo donde el equipo está disponible, pero no está operando. Por ejemplo, cuando el equipo no cuenta con operador, o se encuentra detenido por condiciones operativas o climáticas.
- **Tiempo operativo:** es el tiempo donde el equipo se encuentra disponible y en funcionamiento. Este tiempo se subdivide en tiempo efectivo, pérdidas operacionales y demoras.
- **Tiempo efectivo:** es el tiempo que utiliza el equipo en realizar la función prevista, realizando actividades que contribuyen directamente a la producción. Por lo tanto, incluye todos los elementos necesarios del ciclo de transporte.
- **Tiempo en pérdidas operacionales:** es el tiempo donde el equipo estando en condiciones mecánicas para cumplir con su función prevista, no puede realizarla debido a actividades inevitables que no contribuyen directamente a la producción, pero que son necesarias para permitir la operación. Por ejemplo, tiempo en cola, congestión, entre otras.
- **Demoras:** son las horas donde el equipo está operando, pero está detenido o impedido de realizar su función. Este tiempo se subdivide en demoras programadas y no programadas.
- **Demoras programadas:** son las horas donde el equipo está detenido por tareas asignada. Por ejemplo, cambio de turno, colación, entre otras.
- **Demoras no programadas:** son las horas donde el equipo está detenido por alguna circunstancia imprevista. Por ejemplo, cuando ocurre una falla mecánica, abastecimiento de combustible, charlas de seguridad, entre otras.

De los tiempos mencionados anteriormente, los fundamentales para este trabajo son el tiempo nominal, tiempo efectivo y las pérdidas operacionales. Esto se debe a que se busca reducir las congestiones, lo cual implica una disminución en las pérdidas operacionales y, al disminuirlas, se incrementa el tiempo efectivo. El tiempo nominal, por su parte, es utilizado para posteriores cálculos.

2.5. Índices operacionales

En minería, los índices operacionales son cruciales para medir la efectividad de los procesos, evaluar el sistema y optimizar la operación. Además, permiten determinar la flota de equipos adecuada y realizar cambios y mejoras de manera oportuna. Por lo tanto, para mejorar la productividad se debe controlar los índices operacionales del proceso de transporte. Entre los parámetros operativos más relevantes para este trabajo se encuentran (GMG, 2020):

2.5.1. Disponibilidad Física

Es la porción de tiempo en que el equipo está operativo y listo para cumplir su función prevista durante un periodo específico requerido por la operación. Para su cálculo se utiliza la Ecuación (2)

$$Disponibilidad\ Física = \frac{tiempo\ disponible}{tiempo\ nominal} \tag{2}$$

2.5.2. Utilización efectiva en base nominal

Es el porcentaje del tiempo nominal en que el equipo se encuentra con operador asignado y listo para trabajar. Algunos de los factores que lo condicionan son el número de operadores, el clima, los cambios de turno, exceso o falta de equipos, etc. Para su cálculo se utiliza la Ecuación (3)

$$Utilización\ efectiva\ en\ base\ nominal = \frac{tiempo\ \ efectivo}{tiempo\ nominal} \tag{3}$$

2.5.3. Productividad

La productividad, medida como la producción por unidad de tiempo, considera todas las variables de eficiencia y gestión. Dentro de la visión y las metas de las empresas mineras, es una prioridad constante buscar estrategias y alternativas que permitan aumentar la productividad. Sin embargo, en las últimas décadas, la productividad de la industria minera en Chile ha mostrado una tendencia descendente (Cochilco, 2022).

Dado que la operación de transporte constituye aproximadamente 43 % del costo total de la mina, se lleva cabo la medición y control efectivos de la productividad de las flotas de transporte cuando se busca gestionar y controlar los gastos relacionados con esta operación.

La productividad de los equipos se puede calcular mediante la Ecuación (4).

$$Productividad = N° \ de \ ciclos \ al \ día \ por \ camión \cdot Payload \cdot N° \ camiones \tag{4}$$

Estos parámetros se definen de la siguiente manera (Martinez R. , 2020):

- **Número de ciclos:** para determinar la cantidad de ciclos o vueltas que realiza el equipo de transporte en un tiempo determinado se utiliza la Ecuación (5).

$$N° \ de \ ciclos = \frac{Tiempo \ nominal \ (h) \cdot 60 \left(\frac{min}{h}\right) \cdot \frac{disponibilidad}{100} \cdot \frac{utilización}{100}}{Tiempo \ de \ \ ciclo \ (\text{min})} \tag{5}$$

  Generalmente como tiempo nominal se utiliza una jornada de trabajo, es decir 24 horas.

- **Payload**: carga de material con la que el equipo es cargado al comienzo de cada ciclo.

2.6. Simulación

La simulación es una técnica que busca imitar y reproducir el funcionamiento de un proceso o sistema de la realidad, a lo largo de un período de tiempo. Esto implica la creación y observación de una representación artificial, con el fin de obtener conclusiones sobre las características del sistema real que se está representando (Banks, 1999). Esta representación puede llevarse a cabo de diversas maneras, ya sea de manera manual o digital.

La utilización de modelos de simulación va más allá de las consideraciones económicas, ya que permiten evaluar el comportamiento de sistemas en una variedad de escenarios, tanto inusuales como rutinarios. Además, son esenciales para predecir el rendimiento y la eficacia de diseños experimentales de sistemas, proporcionando una visión detallada de cómo estos se comportarán en condiciones reales. La simulación facilita la identificación de posibles fallos y la optimización de procesos, contribuyendo a una planificación más precisa y a la toma de decisiones informadas.

Uno de los principales tipos de modelo de simulación es el computacional, el cual implica la creación previa de un modelo que emula el comportamiento del sistema real a través de algún *software* especializado.

Además, el modelo se puede clasificar de la siguiente manera (Ortiz, Canchari, & Igle, 2007):

- **Determinísticos:** son modelos cuyos valores de los parámetros se conocen con certeza, sin incorporar aleatoriedad o incertidumbre. Por lo tanto, los resultados de un modelo determinista son siempre los mismos en cada ejecución.
- **Estocásticos:** son modelos que incorporan aleatoriedad e incertidumbre para representar la variabilidad e imprevisibilidad de los sistemas y escenarios del mundo real. Por lo tanto, los resultados de un modelo estocástico varían en cada ejecución de la simulación. En el caso de minería, los modelos estocásticos tienen en consideración la interacción entre equipos

Debido a que las operaciones están sujetas a fluctuaciones en los tiempos de desplazamiento de los camiones, demoras inesperadas en la carga y descarga, y variaciones en la productividad diaria, los modelos estocásticos son más representativos, ya que capturan esta incertidumbre al considerar diferentes escenarios posibles y distribuciones de probabilidad, lo que permite desarrollar soluciones adaptativas y realistas (Torkamani, 2013).

Por el contrario, los modelos determinísticos suponen un mundo estático en el que las variables permanecen constantes, lo que no es representativo de las condiciones dinámicas y cambiantes de la minería. Por ende, estos modelos pueden producir soluciones menos efectivas y preparadas para enfrentar las desviaciones que ocurren en la práctica.

2.6.1. HaulSim

HaulSim es un *software* especializado en simulación de eventos discretos y estocásticos, utilizado con exactitud en la modelación de operaciones mineras. Este *software* conecta los activos de la flota, los planes operativos mineros y el personal para crear un "gemelo digital", con el propósito de proporcionar una representación precisa de las operaciones de transporte de cualquier sitio minero. Esto se logra mediante un motor de simulación de eventos discretos, el cual analiza cómo se comporta el sistema a lo largo del tiempo, lo que permite realizar simulaciones tanto de las operaciones actuales como planificadas, proporcionando resultados que capturan las fluctuaciones y la incertidumbre propias de las actividades mineras. (RPM Global, 2023)

Debido a su interfaz de usuario y su diseño intuitivo, brinda a los usuarios la capacidad de simular tanto las operaciones mineras en curso como las planificadas para el futuro, ya que cuenta con supuestos de productividad, congestión, utilización, disponibilidad, horas de máquina, normas de circulación,

múltiples orígenes y destinos, gestión del sitio, zonas de paso, modelado de equipos individuales y coincidencia de flotas y modelos.

Además, *HaulSim* dispone de las siguientes funciones de simulación:

- Evaluar y analizar el desempeño de un sistema de carguío y transporte.
- Optimizar variables y *KPIs* de un sistema de carguío y transporte.
- Comparar alternativas y escenarios, con la perspectiva de ahorro de tiempo y dinero.
- Toma de decisión en base a evaluaciones más objetivas.
- Ahorro de costos de implantación de soluciones operacionalmente factibles.
- Mejora de los procesos de carguío y transporte.
- Incremento de la productividad e incremento en los ingresos.

En la Figura 2.6 se presenta la interfaz de *HaulSim*, mostrando un modelo tridimensional de una mina a cielo abierto, permitiendo a los usuarios visualizar y analizar diversos aspectos de la operación minera.

Figura 2.6. Interfaz de HaulSim *(RPM Global, 2023)***.**

Los datos de entrada para este *software* incluyen la topografía del sitio, las propiedades de los materiales a transportar, la red de transporte que conecta los puntos de origen y destino dentro de la mina, y los equipos de carguío y transporte que se utilizarán. El proceso para la creación y análisis de un modelo en *HaulSim* consta de los siguientes pasos:

1. **Importación de la capa topográfica**: Se importa la topografía del sitio para modelar el terreno de manera precisa.

2. **Configuración del material**: Se definen las propiedades del material a transportar.

3. **Ubicaciones**: Se agregan las ubicaciones: orígenes, destinos y ubicaciones auxiliares, como talleres y comedores.

4. **Red de rutas**: Se dibuja o importa la red de rutas que conectará las ubicaciones en el modelo.

5. **Reglas de tráfico**: Se configuran las reglas de tráfico: Pare, ceda el paso y límites de velocidad.

6. **Equipos**: Se agregan los equipos de carguío y transporte que estarán operando en la mina.

7. **Grupos**: Los equipos se agrupan según las operaciones a las que están asignados.

8. **Tareas asignadas**: Se especifican las tareas que cada grupo deberá realizar.

9. **Paradas programadas**: Se asignan las paradas programadas para reflejar la disponibilidad real de los equipos.

10. **Ejecución de la simulación**: Se corre la simulación para evaluar el desempeño del sistema.

11. **Análisis de resultados**: Finalmente, se analizan los resultados obtenidos para identificar áreas de mejora y optimización.

En su configuración, es posible restringir las capacidades tanto de los botaderos como de las pilas de lixiviación. Además, brinda la opción de limitar el paso de materiales hacia diversos destinos según su naturaleza. Cuando se estima el tiempo de ciclo, el *software* elige la ruta de menor tiempo, por lo que el circuito que entrega es el óptimo en términos de tiempos de ciclo.

Una característica significativa de este *software* es su capacidad para modelar la velocidad de los camiones utilizando la geometría del yacimiento y las curvas de potencia Rimpull y Retard, las cuales son curvas específicas para cada modelo de camión y son proporcionadas por los fabricantes de estos. Estas gráficas permiten simular el comportamiento del camión dependiendo de la velocidad y la fuerza de tracción para determinadas condiciones de resistencia al movimiento, como la resistencia a la pendiente y la resistencia a la rodadura (Martinez R. , 2020).

El programa utiliza las curvas *Rimpull* cuando el equipo de transporte va en subida (aumentando la elevación) ya sea cargado o vacío. Las curvas *Rimpull* de los equipos utilizados en la faena del estudio se presentan en la Figura 2.7.

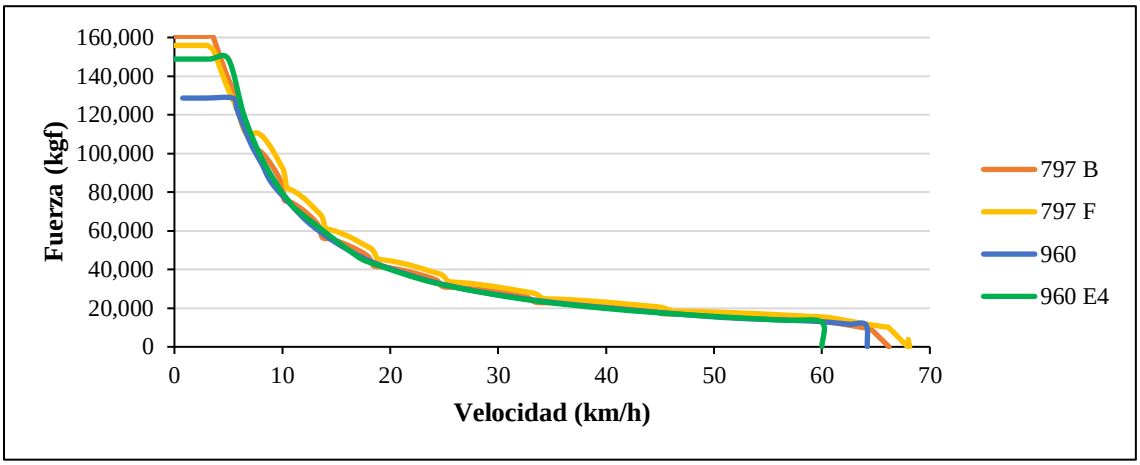


Figura 2.7. Curva Rimpull de los equipos utilizados en la faena de estudio (extraído del software HaulSim).

Además, el programa utiliza curvas *Retard* para calcular las velocidades del equipo de transporte cuando va en bajada (disminuyendo la elevación). Las curvas *Retard* de los equipos utilizados en la faena del estudio se presentan en la Figura 2.8.

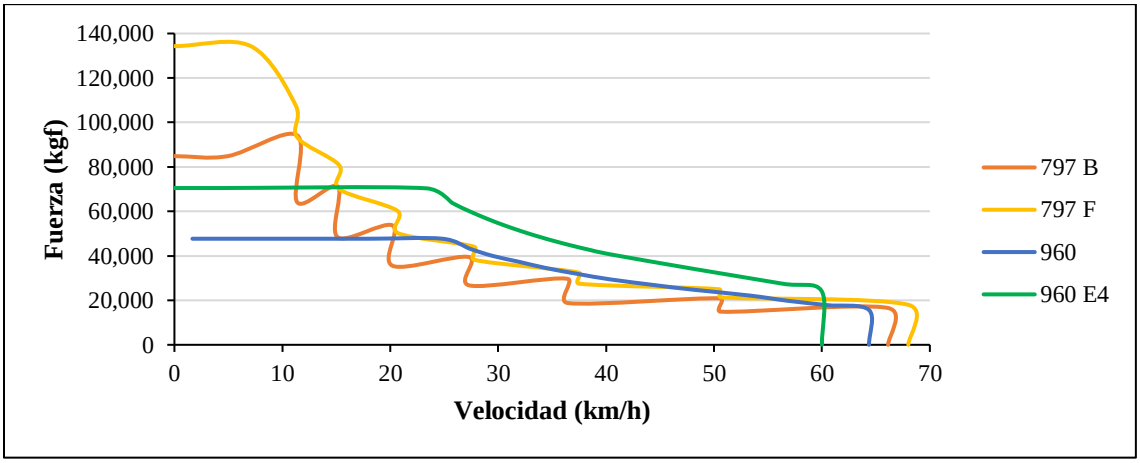


Figura 2.8. Curva Retard de los equipos utilizados en la faena de estudio (extraído del software HaulSim).

Por lo tanto, la velocidad y los tiempos de la simulación, correspondientes a los tiempos de ciclo determinísticos y estocásticos, estarán en función de las curvas rimpull y retad. Esto permite que la simulación ajuste de manera precisa los tiempos de ciclo de transporte en la mina, logrando una aproximación más fiel a las condiciones reales de operación.

3. Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada para la realización de este trabajo. Por lo tanto, para lograr los objetivos propuestos, es necesario seguir las diversas fases que se presentan en la Figura 3.1.

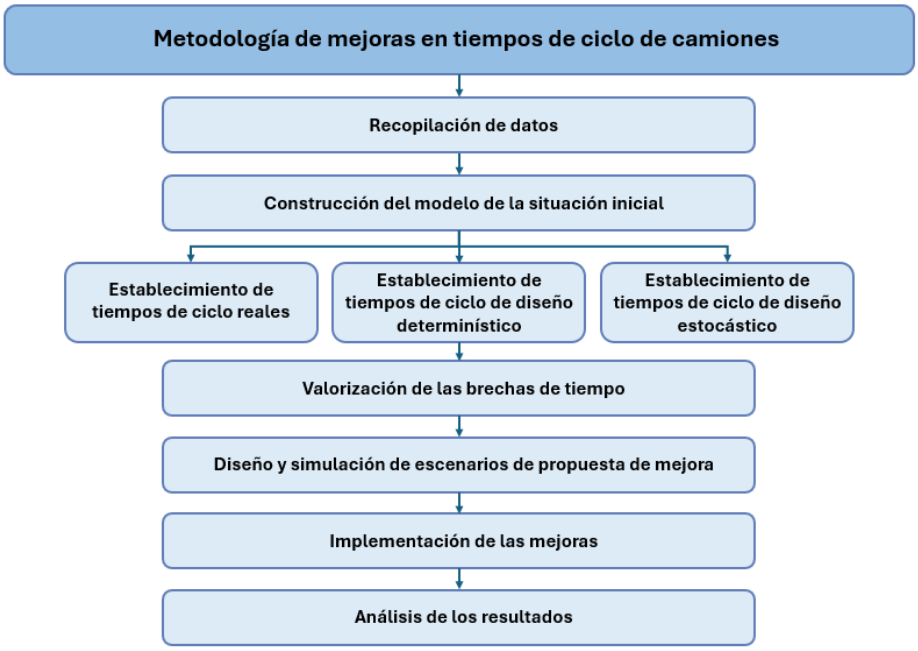


Figura 3.1. Metodología de trabajo (elaboración propia).

La construcción de un modelo de simulación que refleje con precisión las condiciones operativas de la mina en estudio requiere el uso de datos reales. En este contexto, el presente trabajo inicia con la recopilación de datos proporcionados por la empresa, los cuales incluyen información como datos GPS de los equipos, topografía de la mina, cantidad de equipos y el plan diario de producción.

La topografía de la mina ofrece una representación precisa del terreno, lo que resulta esencial para el diseño de caminos de transporte basados en las cotas reales. Este enfoque permite ajustar las rutas de manera exacta a las variaciones del relieve, como pendientes, elevaciones y depresiones, garantizando trayectos seguros y eficientes.

El plan diario de operaciones es otro componente crucial en la construcción del modelo, ya que proporciona una visión de la distribución y utilización de los recursos dentro de la mina. Este plan asegura

que el modelo de simulación refleje adecuadamente las interacciones entre los diferentes equipos y su impacto en el transporte de materiales.

Las imágenes satelitales proporcionan una visualización del contexto operativo de la mina, incluyendo la ubicación de infraestructuras críticas como plantas concentradoras y botaderos.

Las ubicaciones operativas son puntos clave donde se realizan actividades como carga y descarga. Al definir con precisión estas ubicaciones, se puede configurar el modelo de simulación para reflejar fielmente las rutas y las interacciones entre los equipos de carguío y transporte.

Una vez recopilados los datos, se procede a la configuración del modelo de simulación en el *software HaulSim*. Este paso incluye la importación de la topografía y el diseño de las rutas, considerando las ubicaciones de origen y destino. Además, se configuran las propiedades de los materiales que se utilizarán en la simulación, junto con la cantidad y las características técnicas de los equipos de carguío y transporte. También se introducen las demoras programadas.

El siguiente paso es el establecimiento de reglas operacionales en el modelo, como las señalizaciones y rutas unidireccionales que reflejan las condiciones reales de operación en la mina. Además, los equipos de carguío y transporte se agrupan y se les asignan tareas específicas basadas en el plan diario.

Tras la configuración del modelo, se lleva a cabo la ejecución inicial de la simulación y su posterior calibración, utilizando los datos *GPS* de los equipos. Estos datos permiten trazar rutas exactas y analizar las velocidades a las que operan en diferentes tramos dentro de la mina. Este análisis es crucial para identificar áreas problemáticas, como cuellos de botella donde los equipos podrían estar operando por debajo de su capacidad debido a factores como la congestión o las condiciones del terreno.

Los resultados obtenidos de la simulación se comparan con datos reales, como los tiempos de ciclo medidos mediante *GPS*, para ajustar el modelo y mejorar su precisión. Esta calibración asegura que el modelo refleje de manera más fiel las condiciones operativas reales de la mina, lo que es fundamental para obtener resultados confiables.

A partir de la simulación inicial, se realiza un análisis de resultados para detectar brechas entre los tiempos de ciclo simulados y los tiempos reales. Este análisis permite identificar áreas donde se pueden realizar mejoras operacionales, como la reducción de la cantidad de camiones en ciertas fases o la optimización de rutas de transporte.

Luego se analizan los datos estocásticos obtenidos del simulador, lo que permite extraer los tiempos de ciclo logrables. Con estos datos se procede a la valorización de las brechas de tiempo, lo que implica la comparación entre los tiempos de ciclo reales y los tiempos de diseño.

Este análisis de brechas es fundamental para confirmar la validez del modelo, así como para rediseñar rutas y realizar las configuraciones necesarias con el fin de garantizar que el modelo sea efectivo y preciso. Cabe destacar que, si la simulación muestra un tiempo menor al tiempo real, se pueden identificar oportunidades de mejora que podrían ser aprovechadas para optimizar aún más el proceso.

Las oportunidades de mejora encontradas en el paso anterior, que sean factibles de implementar en la realidad, deben diseñarse en el modelo y luego ejecutarse, asegurando que la simulación funcione adecuadamente.

Una vez obtenidos los resultados de los tiempos de ciclo de la simulación con las mejoras, se procede a compararlos con los tiempos de ciclo de la simulación inicial.

4. Desarrollo del estudio

4.1. Recopilación de datos

Antes de configurar el modelo, es necesario realizar un diagnóstico de la situación inicial de la faena. Este proceso implica la recopilación y análisis de los datos proporcionados por la empresa minera, los cuales servirán como datos de entrada para el modelo, tales como los planes diarios, la imagen satelital, la topografía de la mina y las ubicaciones relevantes. A continuación, se proporciona una descripción más detallada de cada parámetro de entrada.

4.1.1. Plan diario

El Plan Diario es un documento que detalla las actividades y operaciones que se llevarán a cabo durante el día en que se emite, para que cada día se tenga el objetivo de apuntar al cumplimiento del plan mensual y hacer frente a los imprevistos del proceso productivo.

Para la realización de este trabajo, se extrajeron del Plan Diario los distintos tipos de material a transportar, junto con sus cantidades estimadas de tonelaje, los orígenes y destinos específicos, y la asignación de los equipos de carguío y transporte necesarios para cumplir cada tarea. A continuación, se presenta un resumen de la información extraída:

- La faena cuenta con 10 orígenes, 20 destinos.
- La flota de equipos de transporte está compuesta por:
  - 42 Komatsu 960 E
  - 2 Komatsu 980 E-4
  - 25 Caterpillar 797 F
  - 97 Caterpillar 797 B
- La flota de equipos de carguío está compuesta por:
  - 13 P&H 4100 XPC
  - 2 Komatsu PC8000-6
  - 5 Caterpillar 994 K

Estos datos recopilados del Plan Diario son fundamentales para este trabajo, ya que proporcionan una visión clara de cómo se planea la operación minera diaria y cómo se gestionan los recursos en la mina.

4.1.2. Imagen satelital

Las imágenes satelitales son una herramienta útil para el desarrollo de proyectos mineros, ya que permite una visualización de la disposición del rajo, suministrando la localización de caminos, zonas de carga y descarga, bahías de combustible, comedores, entre otros. En la Figura 4.1 se aprecia la imagen satelital del yacimiento de estudio.

Figura 4.1. Imagen satelital de la mina en estudio.

Como se aprecia en la figura anterior, la mina presenta dos rajos, los cuales están conectados mediante un camino largo, dos plantas concentradoras y una planta de electro obtención.

4.1.3. Topografía de la mina

La topografía 3D de la mina es la superficie que representa la topografía del yacimiento, esta superficie está a escala, por lo tanto, permite tener la información de las cotas, del relieve y morfología de esta, además de brindar las distribuciones espaciales de diversos lugares. A continuación, se presenta en la Figura 4.2 la topografía del yacimiento de estudio.

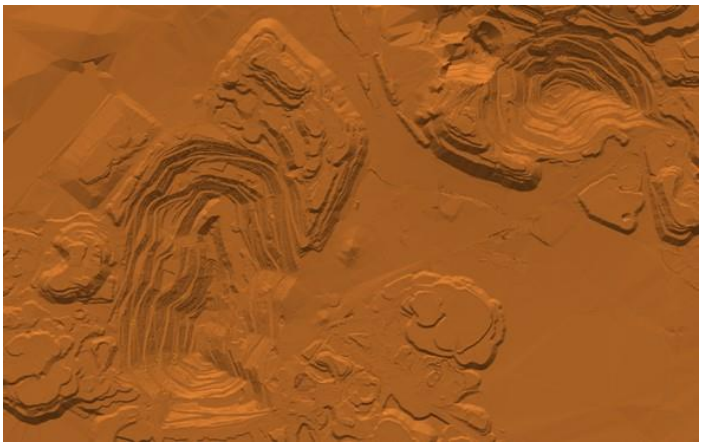


Figura 4.2 Topografía de la mina en estudio.

4.1.4. Ubicaciones

En el contexto de la operación minera, las ubicaciones se refieren a los puntos específicos que los equipos de extracción visitan durante sus recorridos. Estas ubicaciones están definidas por la posición de los equipos de carguío y los lugares destinados para la descarga del material. Para este estudio, se consideraron un total de 6 fases, 7 botaderos, 5 chancadores y 9 stocks. En la Figura 4.3, se proporciona el plano recibido.

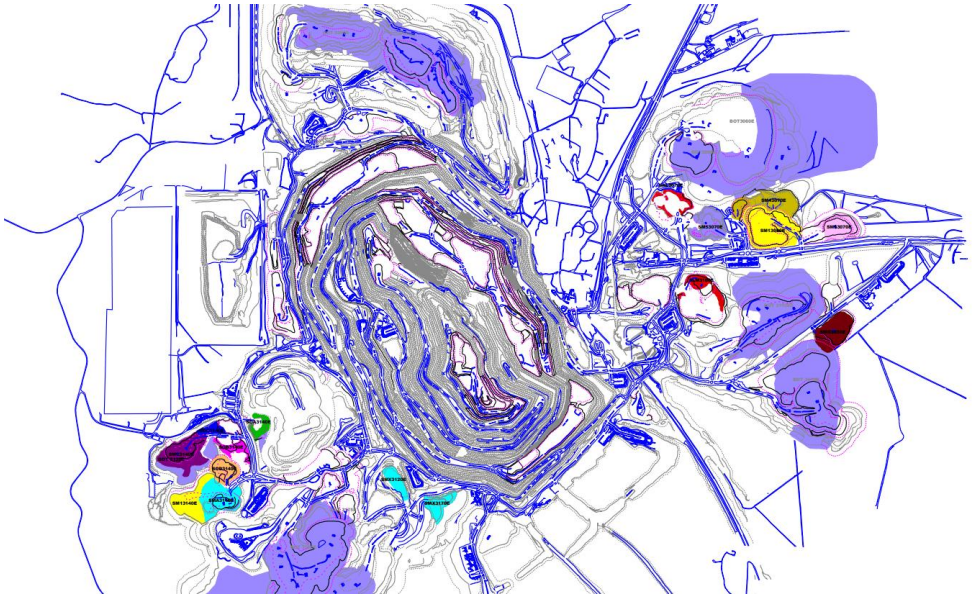


Figura 4.3. Ubicaciones de la mina.

4.2. Construcción modelo de simulación situación inicial

Para llevar a cabo la simulación, se comienza con la digitalización del perfil de transporte en el *software HaulSim*, ingresando los parámetros de entrada mencionados anteriormente. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para la configuración del diseño.

4.2.1. Capa topográfica

La configuración del modelo comienza con la importación de la topografía del complejo de la mina en estudio, lo cual permite una mejor conceptualización de la red de trasporte y un mejor alineamiento con el sitio, ya que proporciona información sobre los desniveles, cambios en las pendientes y obstáculos naturales presentes en la faena.

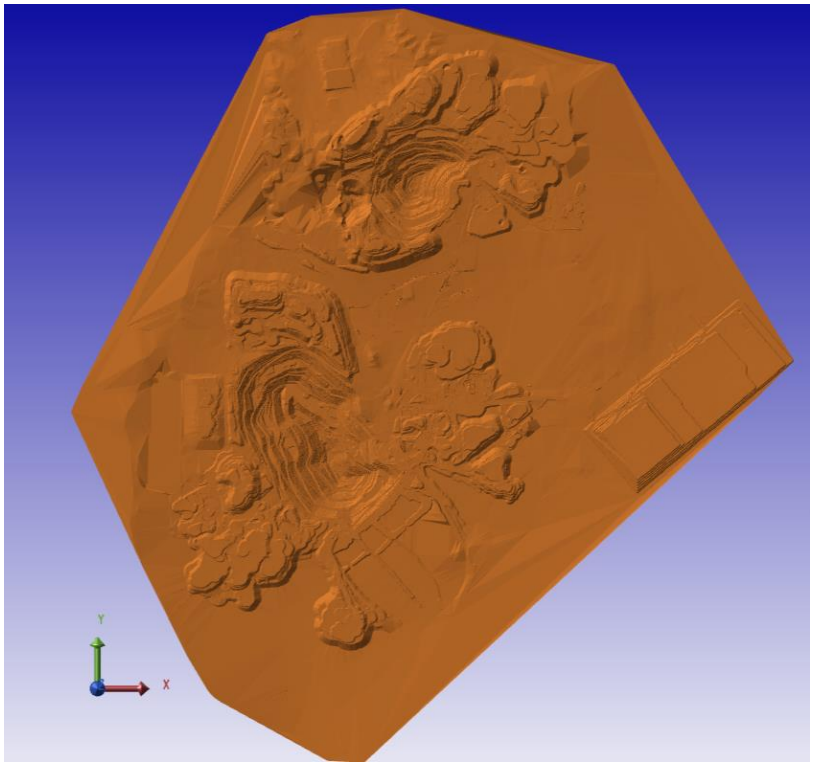


Figura 4.4. Topografía ingresada a HaulSim.

En la Figura 4.4 se aprecian buenas triangulaciones de la topografía, por lo tanto, se continúa con la configuración de los materiales.

4.2.2. Materiales

Se editan las propiedades de los materiales que se usan en la simulación. La densidad del banco es de 1,9 t/m^3 y la categoría de la excavabilidad es duro. Además, para el balde de la cargadora y bandeja del camión, el factor de esponjamiento es de 1,2 t/m^3 y la densidad sin compactar es de 1,58 t/m^3.

A continuación, en la Tabla 4.1 se presenta el factor de llenado utilizado para cada equipo de carguío.

Tabla 4.1. Factor de llenado de los equipos de carguío.

Equipo de carguío	Factor de llenado colmado %	Factor de llenado a ras %
Cargadora frontal	86,25	105,18
Pala de cuerda eléctrica	93,75	93,75
Retroexcavadora hidráulica	57,50	76,67
Pala hidráulica	84,00	98,82
Otro	100	100

Una vez ingresados los datos mencionados anteriormente, se procede a la incorporación de las ubicaciones.

4.2.3. Ubicaciones

El *software HaulSim* permite 3 tipos de ubicaciones, las cuales se describen a continuación.

- **Orígenes:** son las fases donde están ubicados los cargadores. En la Figura 4.5 se observa su representación gráfica.

Figura 4.5. Orígenes en HaulSim.

- **Destinos:** corresponde al lugar donde se deposita el material extraído, por ende, pueden ser botaderos, stocks y/o chancadores. En la Figura 4.6 se observa su representación gráfica.

Figura 4.6. Destinos en HaulSim.

- **Auxiliares:** son los comedores, talleres o bahías de combustible. En la Figura 4.7 se observa la representación gráfica de estos, respectivamente.

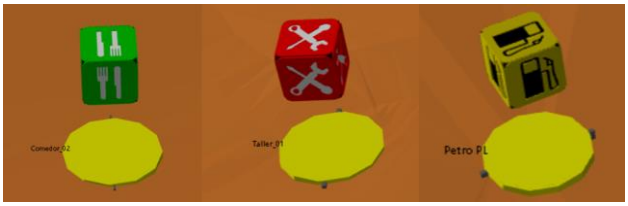


Figura 4.7. Auxiliares en HaulSim.

Para la incorporación de las ubicaciones de la faena se utiliza la imagen satelital y una imagen proporcionada por la empresa minera que contiene las locaciones de los destinos de la faena. Cabe mencionar que solo se colocan las ubicaciones que se utilizan en el plan minero.

Una vez incorporadas todas las ubicaciones, se procede con la realización del sistema de rutas de transporte.

4.2.4. Red de rutas

Se dibujan detalladamente los caminos que forman una red de rutas interconectadas en la mina, esto se realiza observando la imagen satelital y siempre que se realiza un trazo se procura que la pendiente de los caminos no sobrepase el 10%. En la Figura 4.8 se observan las rutas ingresadas en el *software*.

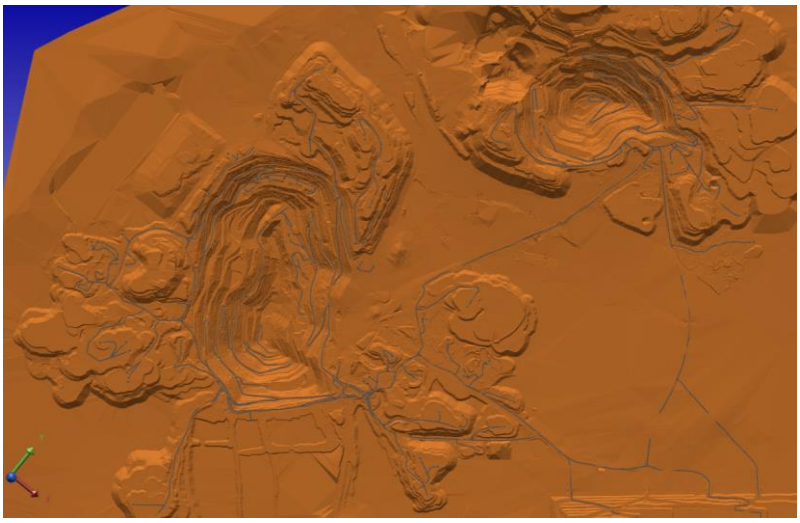


Figura 4.8. Red de rutas ingresada en HaulSim.

Una vez ingresados todos los caminos y ubicaciones en el modelo, es fundamental agregar los límites de velocidad, así como las reglas de tráfico que rigen en el complejo en cuestión.

4.2.5. Reglas de tráfico

Establecer señaléticas y límites de velocidad en la industria minera es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores, prevenir accidentes, alargar la vida útil de los equipos y cumplir con las regulaciones y normativas pertinentes.

A continuación, se presentan algunas de las señaléticas incorporadas en el modelo.

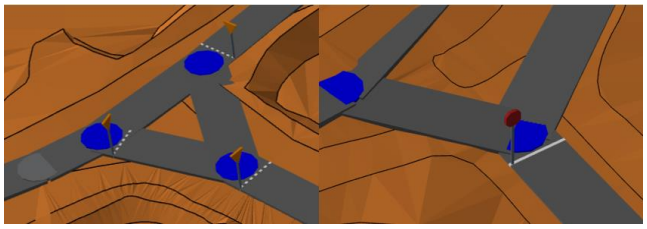


Figura 4.9. Reglas de tráfico ingresadas en HaulSim.

Además, se requiere la inclusión de reglas de ruta unidireccional, esto debido a las dimensiones de ciertos caminos en el rajo donde los anchos permiten un solo camión o para forzar que los camiones realicen un recorrido en específico en el programa, ya que el *software* arroja automáticamente la ruta mas corta y en la realidad no se realiza esa ruta. En la Figura 4.10 se observan flechas verdes, estas indican la dirección obligatoria de esa vía.

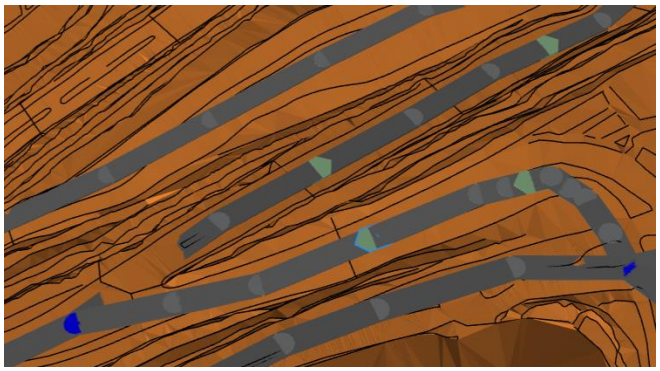
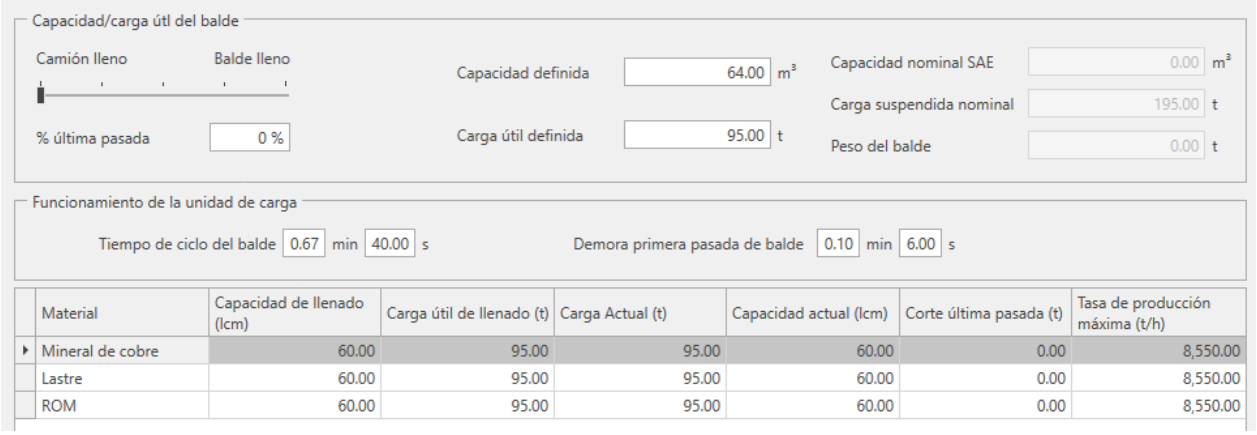


Figura 4.10. Regla de ruta unidireccional en HaulSim.

4.2.6. Equipos

El *software* dispone de una biblioteca detallada de equipos de carguío y transporte, cada una con sus características técnicas distintivas.

El proceso de incorporación de equipos al modelo comienza con el ingreso de las unidades de carga necesarias. En este proyecto, se han empleado las siguientes unidades de carga: 13 palas de cuerda P&H 4100 XPC, 5 cargadores frontales Caterpillar 994 K y 2 palas hidráulicas Komatsu PC 8000-6. Para cada una de estas unidades, se han proporcionado datos de entrada relativos a su funcionamiento, que incluyen aspectos como la capacidad del camión lleno, el tiempo de ciclo del balde, la carga útil de llenado y la capacidad definida. Estos datos se observan en la Figura 4.11.



Material	Capacidad de llenado (lcm)	Carga útil de llenado (t)	Carga Actual (t)	Capacidad actual (lcm)	Corte última pasada (t)	Tasa de producción máxima (t/h)
Mineral de cobre	60.00	95.00	95.00	60.00	0.00	8,550.00
Lastre	60.00	95.00	95.00	60.00	0.00	8,550.00
ROM	60.00	95.00	95.00	60.00	0.00	8,550.00

Figura 4.11. Configuración equipos de carguío.

Para mayor detalle, en la Tabla 4.2 se presenta el equipo de carguío junto con la cantidad asignada para cada fase.

Tabla 4.2. Equipos de carguío según fase.

Fase	N° equipos de carguío	Modelo equipos de carguío
Fase_1	1	P&H - 4100 XPC
Fase_2	1	Komatsu - PC 8000-6
Fase_3	2	P&H - 4100 XPC
Fase_4	1	Komatsu - PC 8000-6
Fase_5	4	P&H - 4100 XPC
Fase_6	6	P&H - 4100 XPC
STK_1	1	Caterpillar - 994 K
STK_2	1	Caterpillar - 994 K
STK_3	1	Caterpillar - 994 K
STK_4	1	Caterpillar - 994 K
STK_5	1	Caterpillar - 994 K

Luego de eso, se procede a agregar las unidades de transporte. Para este modelo específico, se incluyen un total de 97 Caterpillar 797 B, 25 Caterpillar 797 F, 42 Komatsu 960 E y 2 Komatsu 980 E-4. A continuación, en la Tabla 4.3 se muestran los modelos de equipos de transporte y la cantidad asignada a cada fase.

Tabla 4.3. Situación inicial equipos de transporte según origen.

Fase	Caterpillar - 797 B	Caterpillar - 797 F	Komatsu - 960 E	Komatsu - 980 E-4	N° total Equipos
Fase_1	4	1	3	0	8
Fase_2	3	1	2	0	6
Fase_3	5	2	2	0	9
Fase_4	2	1	1	0	4
Fase_5	36	9	4	2	51
Fase_6	43	16	2	1	62
STK_1	2	1	1	0	4
STK_2	1	1	0	1	3
STK_3	1	0	1	0	2
STK_4	1	1	0	0	2
STK_5	1	1	0	0	2

Es relevante mencionar que la suma total de equipos de transporte indicada en la tabla supera la cantidad real, esto se debe a que algunos equipos son utilizados para múltiples orígenes.

Al momento de integrar tanto las unidades de carga como las de transporte en el modelo, es necesario especificar su ubicación de origen.

En el marco de este proyecto no se contempla la inclusión de equipos auxiliares, pero es importante mencionar que el programa admite la inserción de estos elementos en caso de ser necesario.

4.2.7. Grupos

Después de haber ingresado todos los equipos de carga y transporte, es necesario agruparlos y asignar dichos grupos de manera que cada conjunto de transporte se asocie adecuadamente con su equipo de carguío correspondiente.

El primer paso, representado en la Figura 4.12, consiste en la agrupación de equipos de carguío. En esta etapa, se crean grupos nombrándolos por la fase y se asignarán sus palas correspondientes según plan.

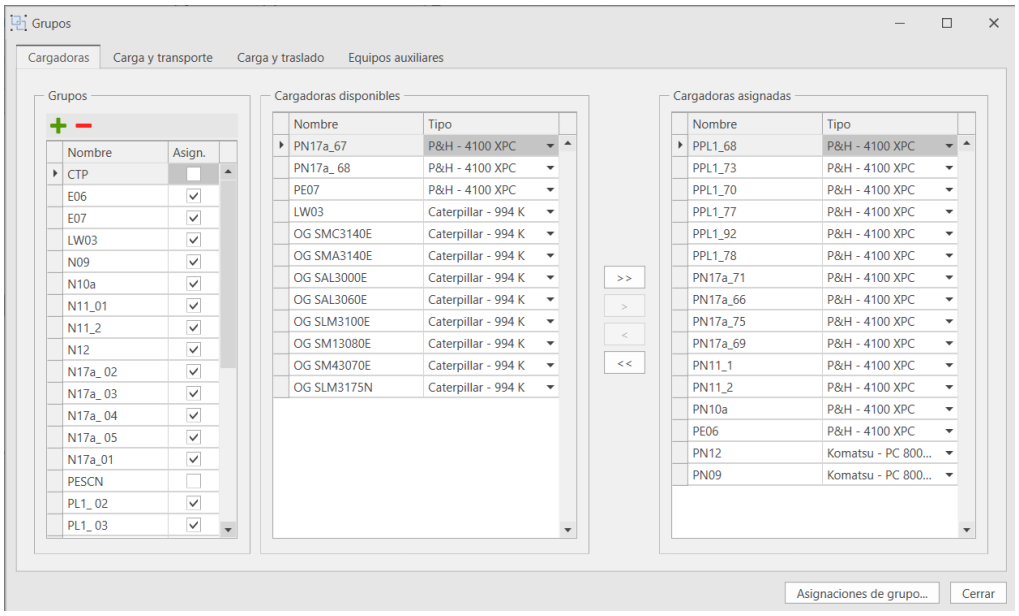


Figura 4.12. Grupo de equipos de carguío.

El segundo paso consiste en aplicar el mismo procedimiento, pero esta vez enfocado en la asignación de los equipos de transporte. En la Figura 4.13 se muestra la ventana de *HaulSim* que detalla esta asignación. Es importante señalar que algunos equipos de transporte pueden estar asignados a más de una fase.

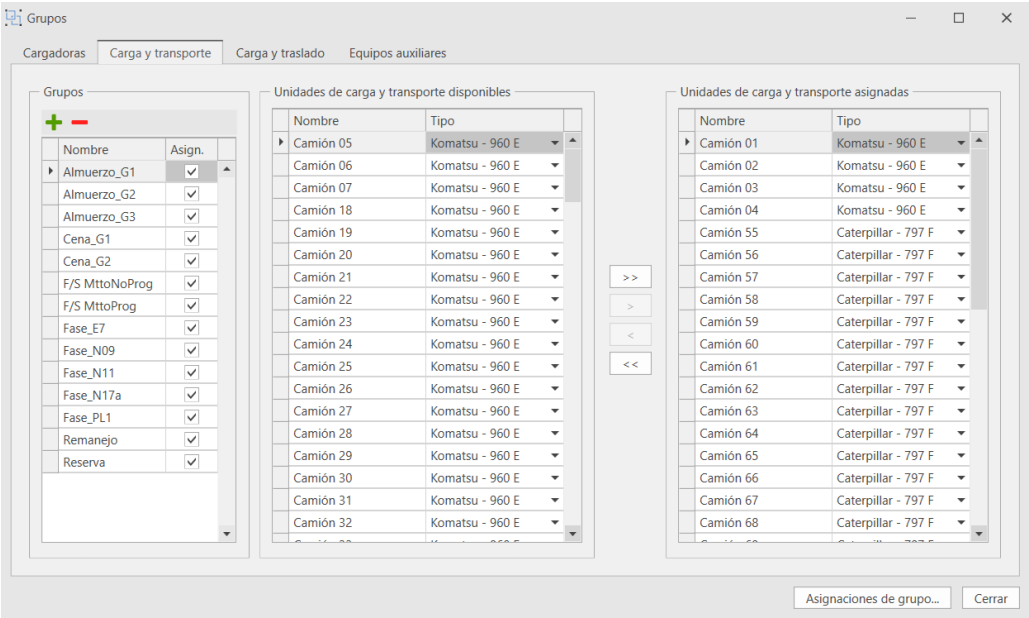


Figura 4.13.Grupo de equipos de transporte.

El paso final de esta etapa es la asignación de los grupos generados, por lo tanto, para cada grupo de palas se debe asignar su grupo de equipos de transporte. En la Figura 4.14 se observa las asignaciones realizadas.

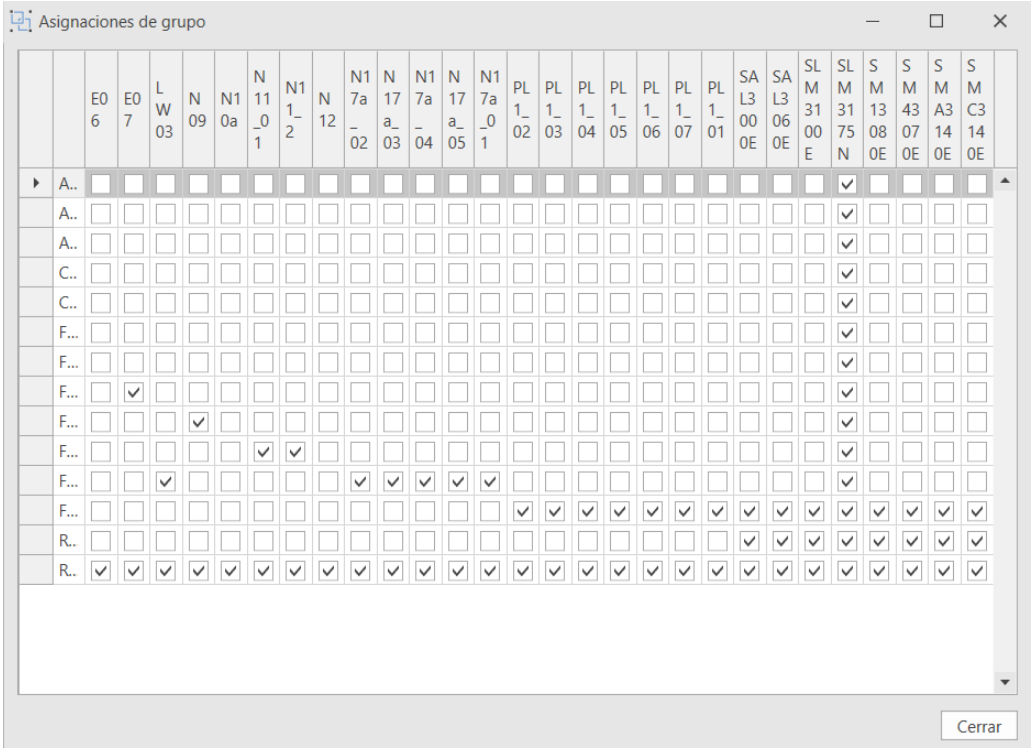


Figura 4.14. Asignación de los grupos.

4.2.8. Tareas

A continuación, se requiere asignar a los grupos de equipos las tareas correspondientes según plan. Estas determinarán las acciones que deben llevar a cabo los equipos dentro del modelo. Durante este proceso, también se debe especificar el tipo de material a transportar y la cantidad de tonelaje. En la Figura 4.15 se muestra la ventana de *HaulSim* con la asignación de tareas que debe realizar la simulación.

Tareas

Grupo de tareas | Tarea

Tareas

Duración de uso

Grupo						Tarea						
ID de grupo	Tipo de grupo	Equipo primario	Editar	Velocidad objetivo de despachador (t)	Duración	Origen	Destino	Material	Cantidad (t)	Equipo secundario	Ciclos de trabajo	Id
1	Carga y transporte	PN17a_66		8,550.00	1.00:00:00	N17a_2	BOT3160E	Lastre	20,000.00		∞	1
							SMC3140E	Mineral de cobre	20,000.00		∞	20
							BOT3230E OLD	Lastre	22,000.00		∞	21
							BOT3180E	Lastre	20,000.00		∞	54
2	Carga y transporte	PN17a_75		8,550.00	1.00:00:00	N17a_3	SLM3100E	Mineral de cobre	20,000.00		∞	2
							BOT3160E	Lastre	30,000.00		∞	22
							SM43070E	Mineral de cobre	10,000.00		∞	23
							BOT3180E	Lastre	20,000.00		∞	55
3	Carga y transporte	PN17a_69		8,550.00	1.00:00:00	N17a_4	CH1	Mineral de cobre	10,000.00		∞	3
							BOT3160E	Lastre	26,000.00		∞	24
							SM13080E	Mineral de cobre	20,000.00		∞	25
							BOT3180E	Lastre	20,000.00		∞	56
4	Carga y transporte	PN17a_67		8,550.00	1.00:00:00	N17a_5	CH2	Mineral de cobre	30,000.00		∞	4
							P3F30 / P3F31	Mineral de cobre	30,000.00		∞	26
							CH3	Mineral de cobre	20,000.00		∞	27
5	Carga y transporte	PPL1_68		8,550.00	1.00:00:00	PL1_1	P3F30 / P3F31	Mineral de cobre	4,000.00		∞	5
							BOT3150E OLD	Lastre	4,000.00		∞	28
							SM63030E	Mineral de cobre	62,000.00		∞	29
6	Carga y transporte	PPL1_73		8,550.00	1.00:00:00	PL1_2	P3F30 / P3F31	Mineral de cobre	50,000.00		∞	6
							BOT3070E OLD	Lastre	13,000.00		∞	30
							BOT3170/75 OLD	Lastre	13,000.00		∞	31
7	Carga y transporte	PPL1_70		8,550.00	1.00:00:00	PL1_3	CH2	Mineral de cobre	30,000.00		∞	7
							CH1	Mineral de cobre	20,000.00		∞	32

Figura 4.15. Tareas según plan.

4.2.9. Paradas

Se deben ingresar las paradas programadas, las cuales incluyen el cambio de turno, almuerzo, cena y mantenimiento programado. En la Figura 4.16 se muestra la ventana configuración de *HaulSim* que detalla las configuraciones para los equipos de transporte.

Paradas regulares

Unidades de carga | Unidades de transporte | Transportadores | Equipos auxiliares | Orígenes | Destinos

Activo	Nombre	Viajar a	Ubicación	Estado	Empezar...	Duración	Unidades	Repetir	Unidades	Grupo
☑	Cambio Turno...	No recorrer		Cambio de turno	07:40	45.00	Minut...	24.00	Horas	[All]
☑	Mtto Prog	Taller más cercano		Avería	07:40	720.00	Minut...	12.00	Horas	F/S...
☑	Almuerzo G1	Comedor más cercano		Almuerzo	13:00	60.00	Minut...	12.00	Horas	Alm...
☑	Almuerzo G2	Comedor más cercano		Almuerzo	14:00	60.00	Minut...	12.00	Horas	Alm...
☑	Almuerzo G3	Comedor más cercano		Almuerzo	15:00	60.00	Minut...	12.00	Horas	Alm...
☑	Cena G1	Comedor más cercano		Almuerzo	01:00	60.00	Minut...	12.00	Horas	Cen...
☑	Cena G2	Comedor más cercano		Almuerzo	02:00	60.00	Minut...	12.00	Horas	Cen...

Figura 4.16. Paradas programadas de equipos de transporte.

Para los equipos de carguío también se estableció el horario de almuerzo, cena y cambio de turno. No obstante, durante el período simulado no se incluyeron mantenimientos programados para dichos equipos, lo que permitió que operaran de manera ininterrumpida.

4.2.10. Ejecución y reportes

Finalmente, se procede a la ejecución de la simulación, con especial atención a que los equipos de transporte desempeñen sus tareas de manera precisa y sin enfrentar detenciones inusuales.

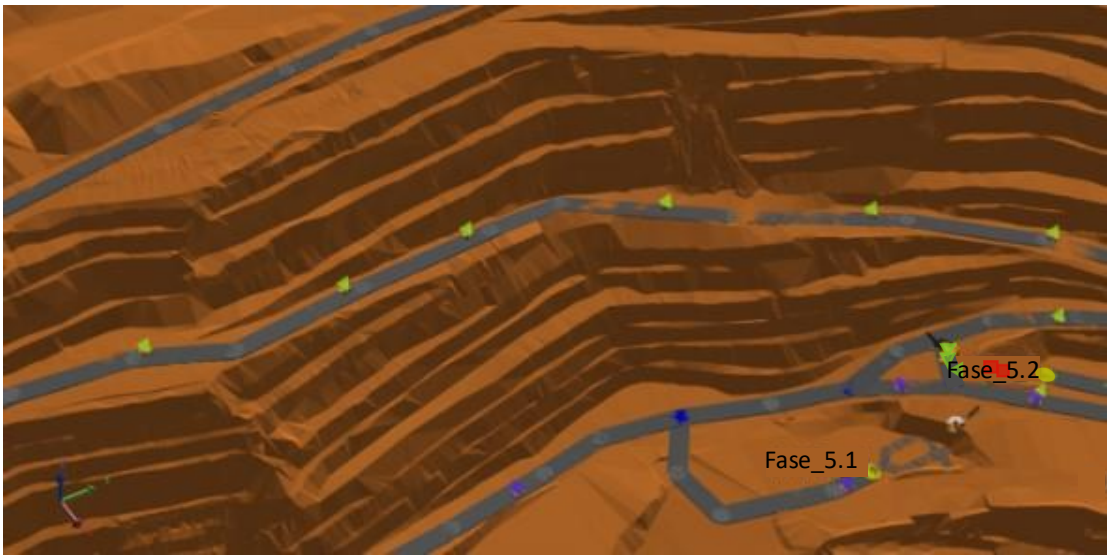


Figura 4.17. Ejecución de la simulación.

Como se muestra en la Figura 4.17, los camiones detenidos están marcados con un cuadrado rojo sobre ellos, estos se encuentran en la fase 5 esperando en cola para ser cargados por la pala. Además, se pueden ver triángulos verdes, que representan a los camiones vacíos bajando hacia la pala. Por otro lado, con un triángulo morado se representan a los camiones cargados que van en subida. Una vez que la simulación se ejecute de manera satisfactoria, se procede a la extracción de los reportes generados por el *software*, escogiendo el escenario que presente la mayor cantidad de tonelaje. Para el caso de este trabajo solo se utiliza el reporte de movimiento de material, ya que este permite obtener información crucial, como los tiempos de ciclo y los tiempos de viaje de los equipos de transporte. La Figura 4.18 presenta un ejemplo de la planilla de Excel utilizada para ingresar los datos del reporte y obtener los tiempos correspondientes. Es importante destacar que los datos extraídos se pegan en una hoja del excel, mientras que la hoja mostrada en la figura está automatizada para procesar dicha información.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Scenario Name	Origen	Destino	Medio Tiempo	TC	Medio TV	TV								
Scenario 01	N17	CH2	15,45		12,44					Row Labels	Average of TC		Row Labels	Average of TV
Scenario 01	N17	CH2	25,98	41,43	24,42	36,86				⊟E07	42,23354839		⊟E07	36,94383065
Scenario 01	N09	Ch5	39,96		30,95					BOT3150E	42,23		BOT3150E	36,94383065
Scenario 01	N09	Ch5	29,21	69,17	27,65	58,6				⊟N09	57,91638889		⊟N09	51,72074074
Scenario 01	N09	Ch5	19,99		15					Ch5	57,92		Ch5	51,72074074
Scenario 01	N09	Ch5	30,14	50,13	27,66	42,66				⊟N11	48,67585242		⊟N11	44,35923664
Scenario 01	N09	Ch5	20,04		15					BOT3172N	39,60		BOT3172N	35,53439791
Scenario 01	N09	Ch5	29,22	49,26	27,65	42,65				P3F30 / P3F3:	57,45		P3F30 / P3F31	52,68775862
Scenario 01	N09	Ch5	19,93		15					SM63030E	57,01		SM63030E	52,72476744
Scenario 01	N09	Ch5	29,24	49,17	27,65	42,65				⊟N17	53,18653279		⊟N17	45,07167213
Scenario 01	N09	Ch5	20,02		15					BOT3230E	41,14		BOT3230E	32,25279412
Scenario 01	N09	Ch5	29,24	49,26	27,65	42,65				CH2	54,42		CH2	46,36542565
Scenario 01	N09	Ch5	23,86		19,55					SLM3100E	55,90		SLM3100E	48,04492611
Scenario 01	N09	Ch5	29,35	53,21	27,76	47,31				⊟PL1	58,7905309		⊟PL1	53,89511094
Scenario 01	N09	Ch5	20,45		15,46					BOT3150E	56,66		BOT3150E	51,943
Scenario 01	N09	Ch5	29,30	49,75	27,76	43,22				CH2	46,83		CH2	41,98809917
Scenario 01	N09	Ch5	20,13		15					P3F30 / P3F3:	79,37		P3F30 / P3F31	74,12331915
Scenario 01	N09	Ch5	29,46	49,59	27,88	42,88				SLM3100E	56,03		SLM3100E	51,18601824
Scenario 01	N09	Ch5	19,35		15					SM13080E	58,81		SM13080E	54,08
Scenario 01	N09	Ch5	29,31	48,66	27,76	42,76				SM63030E	55,66		SM63030E	50,81553488
Scenario 01	N09	Ch5	19,29		15					⊟SAL3060E	41,92147826		⊟SAL3060E	28,74382609
Scenario 01	N09	Ch5	29,29	48,58	27,76	42,76				CH2	33,36		CH2	20,09675
Scenario 01	PL1	CH2	27,19		23,49					Ch5	46,49		Ch5	33,3556
Scenario 01	PL1	CH2	25,00	52,19	22,81	46,3				⊟SLM3100E	46,71146789		⊟SLM3100E	35,81247706

Figura 4.18. Plantilla de excel para obtención de tiempos de ciclo estocásticos.

4.3. Calibración de la simulación

Una vez configurado el modelo, es crucial contar con información real para comparar los resultados obtenidos y, de esta manera, calibrar adecuadamente el modelo. Para la calibración, el principal parámetro empleado es el tiempo de ciclo, comparando los tiempos de ciclo obtenidos de la simulación con los tiempos de ciclo de los datos *GPS*. Además, se utiliza la información de velocidades proporcionada por la empresa minera para establecer límites de velocidad en ciertos tramos.

4.3.1. Datos GPS de equipos de carga y transporte

Los datos *GPS* permiten obtener información detallada sobre las rutas y la velocidad de los equipos de transporte. Esto facilita la identificación de tiempos de inactividad, cuellos de botella y áreas de mejora en el proceso. Con esta información, es posible proponer rutas más eficientes, reducir el tiempo de ciclo y el consumo de combustible, y, en consecuencia, disminuir los costos operativos.

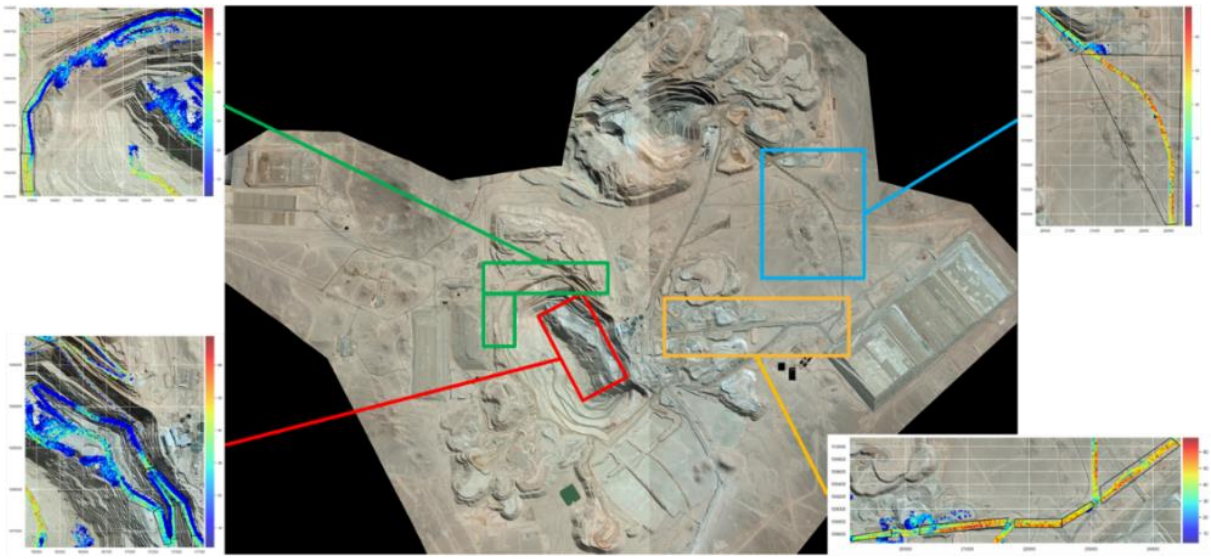


Figura 4.19. Mapa de velocidades sectorizado.

En la figura anterior se observa un mapa de calor de velocidades, en el cual se observan las rutas que realizan los camiones y su velocidad respectiva. En las imágenes de la izquierda se observan más puntos azules, lo cual significa que en esas zonas se tiene generalmente velocidades menores a 15 km/h y varias detenciones.

4.3.2. Velocidades por tramo

En la Tabla 4.4 se presentan las velocidades por tramo proporcionadas por la empresa minera, las cuales permiten establecer límites de velocidad en ciertos sectores para mejorar la precisión de la simulación. Por ejemplo, aunque la simulación permita que el camión circule a más de 65 km/h, en realidad esto no ocurre debido a los límites de velocidad. Para que los tiempos de ciclo de la simulación se acerquen a la realidad, se añade una restricción en el tramo.

Tabla 4.4. Velocidades por tramo.

Tramo	Velocidad km/h
Bajando cargado	16
Bajando vacío	33
Cargado a Pilas	35
Cargado dentro del rajo	18
Cargado fuera del rajo	25
Subiendo Cargado	12
Subiendo vacío	24
Vacío a pilas	45
Vacío dentro del rajo	22
Vacío fuera del rajo	35

4.4. Simulación situación inicial

Una vez finalizada la calibración, se ejecuta nuevamente el modelo, seleccionando la simulación que transporta la mayor cantidad de tonelaje. Los tiempos de ciclo obtenidos para cada origen y destino establecidos en el plan diario se presentan en la Tabla 4.5. Esta tabla incluye los tiempos de ciclo planificados, los tiempos reales medidos mediante GPS, los tiempos determinísticos, que son fijos y no presentan variabilidad, y los tiempos estocásticos, que incorporan las variaciones del proceso

Tabla 4.5. Tiempos de ciclo simulación situación inicial.

Origen	Destino	Tiempos de ciclo Plan min	Tiempos de ciclo Real min	Tiempos de ciclo Det min	Tiempos de ciclo Est min
Fase_1	BOT_1	40,4	55,4	39,5	50,5
Fase_1	CH_1	31,4	39,9	26,1	37,8
Fase_1	CH_3	37,7	39,7	25,8	38,8
Fase_1	CH_4	60,3	71,1	57,4	65,9
Fase_1	STK_1	36,0	39,5	30,0	37,1
Fase_1	STK_3	41,1	74,2	35,4	51,6
Fase_1	STK_6	37,7	50,1	32,7	47,0
Fase_2	CH_5	57,2	62,7	46,9	60,5
Fase_3	BOT_2	30,1	37,0	28,1	32,6
Fase_3	BOT_7	38,0	47,3	30,3	43,5
Fase_4	BOT_3	40,1	45,3	36,9	44,6
Fase_5	BOT_4	42,1	58,8	41,6	57,2
Fase_5	BOT_5	37,9	53,1	36,1	52,6
Fase_5	CH_1	49,4	74,4	49,6	72,3
Fase_5	CH_3	49,5	70,4	49,2	68,4
Fase_5	CH_4	79,5	95,5	79,2	93,9
Fase_5	STK_1	53,9	73,2	53,4	68,5
Fase_5	STK_3	54,0	75,3	53,3	69,1
Fase_5	STK_7	58,1	69,7	57,4	67,8
Fase_5	STK_5	41,3	60,0	39,5	58,1
Fase_6	BOT_6	60,3	69,5	50,6	68,4
Fase_6	BOT_1	79,4	98,2	71,7	87,1
Fase_6	CH_1	50,2	55,0	40,9	54,0
Fase_6	CH_3	53,3	62,2	41,6	55,0
Fase_6	CH_4	83,2	92,7	72,5	90,9
Fase_6	STK_1	55,2	65,1	45,8	63,7
Fase_6	STK_3	67,6	80,9	51,7	72,8
Fase_6	STK_8	79,3	98,2	68,9	94,0
Fase_6	STK_7	64,2	73,0	51,9	70,8
Fase_6	STK_6	54,0	68,1	48,9	67,3
Fase_6	STK_9	81,0	99,1	77,2	96,5
STK_1	CH_1	24,4	29,8	16,2	28,0
STK_1	CH_3	23,6	27,8	15,4	27,5
STK_1	CH_5	45,2	58,8	33,3	58,2
STK_2	CH_5	17,2	41,2	13,6	37,1
STK_3	CH_4	37,0	67,4	34,5	46,9
STK_4	CH_2	21,0	28,6	13,3	24,0
STK_5	CH_2	20,7	29,8	14,0	26,0

De la tabla anterior se observa que, todos los tiempos estocásticos son mayores que los tiempos determinísticos. Esto refleja que, en la práctica, las variaciones propias del proceso, como las demoras inesperadas, incrementan los tiempos de ciclo en comparación con los tiempos ideales o planeados. En Anexos 1 se presentan los gráficos de los tiempos de ciclo para cada origen.

A continuación, en la Figura 4.20 se presentan las diferencias absolutas y relativas de los tiempos reales y estocásticos.

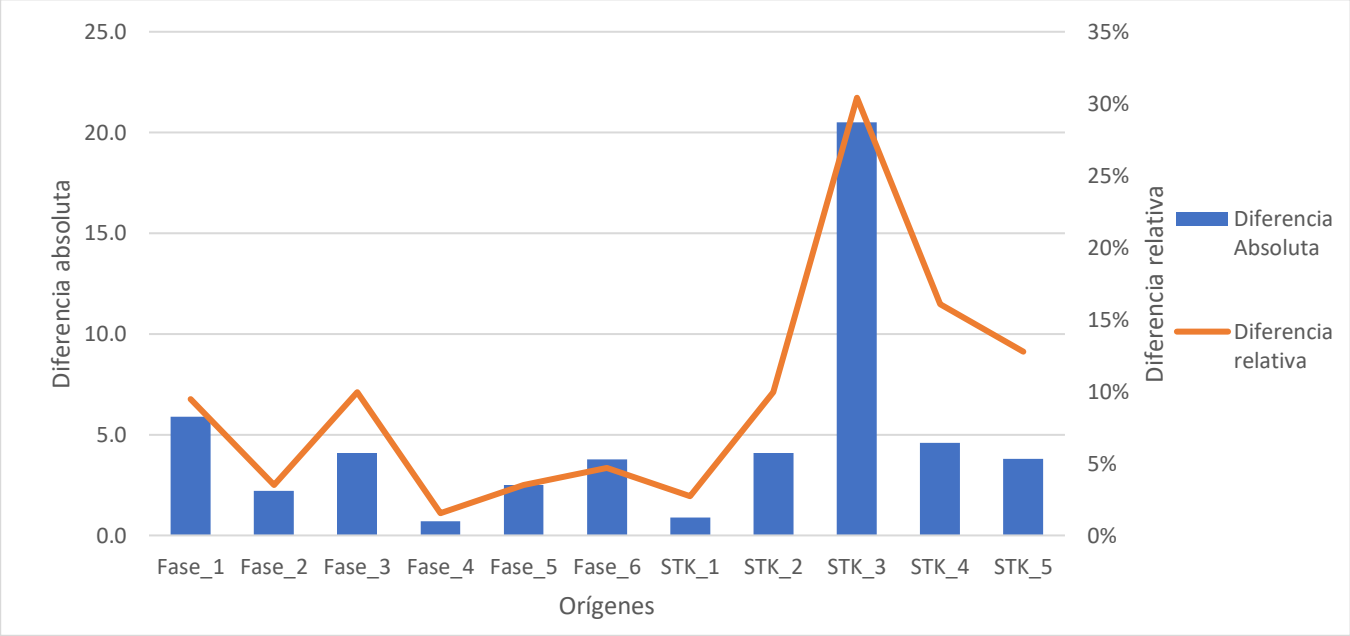


Figura 4.20. Diferencia absoluta y relativa.

Del análisis del gráfico se desprende que el modelo de simulación se ajusta adecuadamente a los tiempos de ciclo reales en la mayoría de las fases y stocks. El modelo interpreta correctamente la realidad en la mayoría de las áreas, mostrando diferencias menores entre los tiempos estocásticos y los reales. Sin embargo, en el stock 3 se observa una discrepancia mayor. A pesar de esto, el modelo sigue siendo representativo, ya que esta diferencia podría deberse a factores específicos como irregularidades en el terreno o variaciones en las condiciones operativas, como desviaciones en la operación diaria, que no están completamente reflejadas en el modelo de simulación.

4.5. Brechas situación inicial

En este apartado se realiza una comparación de los tiempos de ciclo para cada origen y destino definidos en el plan diario, los valores reales y los obtenidos por diseño, es decir determinísticos y estocásticos.

Al realizar la comparación entre todos los tiempos de ciclo utilizando la Tabla 4.5, que incluye los tiempos de ciclo planificados, los tiempos reales medidos mediante GPS, los tiempos determinísticos, que son fijos y no presentan variabilidad, y los tiempos estocásticos, que incorporan las variaciones del proceso se tiene que la simulación tiene un error absoluto promedio de 4,0 min. Mientras que el error relativo promedio del 7,81 %, sugiere que la simulación es bastante precisa en relación con los valores reales.

Además, en la Figura 4.21 se presenta la diferencia entre los tiempos de ciclo estocásticos (TC Est) y los tiempos de ciclo deseados (TC Plan) para diversos orígenes y destinos, expresados en minutos, por lo tanto, se aprecian las brechas de tiempo alcanzables. En esta figura, las brechas que presentan una mejor oportunidad de mejora se encuentran en la fase 5 hacia los chancadores (CH1 y CH3). Por lo tanto, este gráfico sirve como base para identificar y ejecutar acciones destinadas a reducir los tiempos de ciclo reales.

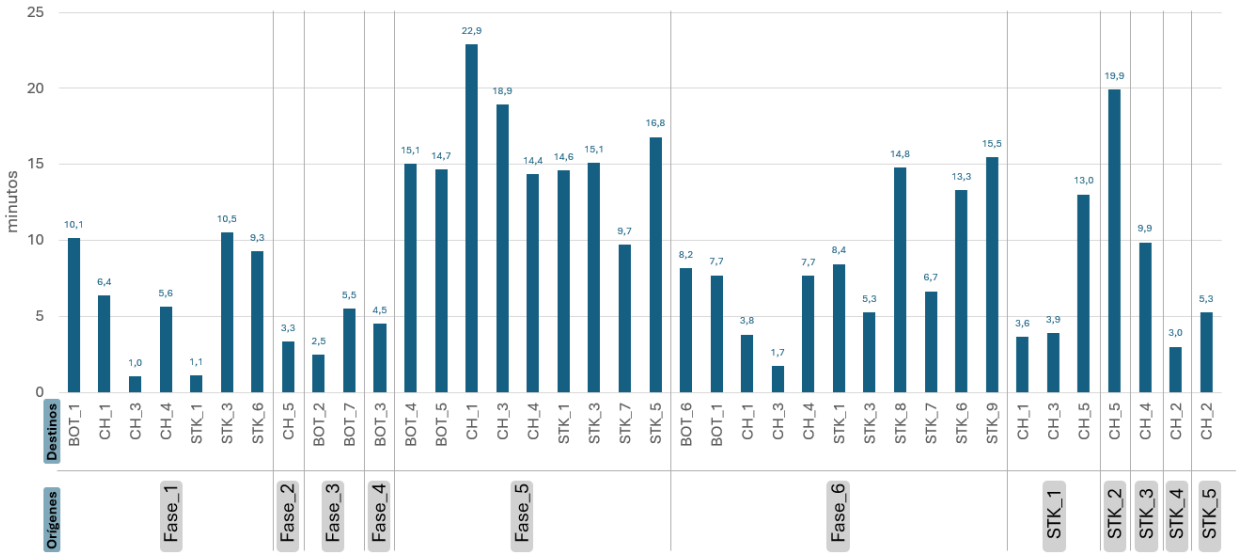


Figura 4.21. Brechas de tiempo mejorables.

Como se observa en la figura anterior, existen brechas entre los tiempos de ciclo del plan y los tiempos de ciclo estocásticos. Estas diferencias pueden deberse a diversas causas de demoras o tiempos no planificados en el ciclo de transporte minero, tales como lo son las congestiones y problemas de logística. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se propondrán mejoras en el diseño con el propósito de reducir estas brechas y optimizar los tiempos de transporte. Las fases que deben recibir mayor atención, debido a la cantidad de tonelaje que mueven y a la amplia brecha, son las fases 5, 6 y 1.

Con el fin de facilitar una visualización más clara, se presenta la Figura 4.22, que muestra el promedio de las brechas de tiempo obtenidas en cada fase.

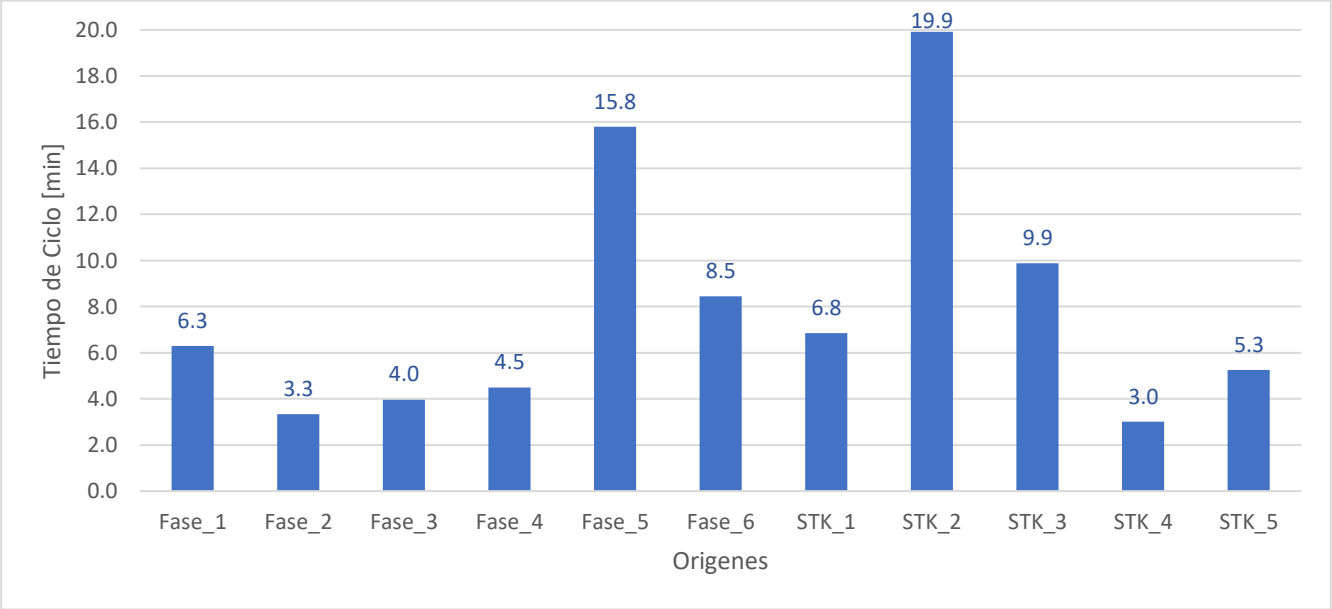


Figura 4.22. Promedio por fase de las brechas de tiempo mejorables.

4.6. Propuestas de mejoras

Las oportunidades de mejora se diseñan en el modelo y se ejecuta la simulación, manteniendo la cantidad de tonelaje establecida en el plan minero. Cabe mencionar que las mejoras fueron implementadas en el orden que se mencionan.

4.6.1. Reducción de la cantidad de camiones

El objetivo es asegurar que los equipos de carguío y transporte operen a su máxima capacidad, minimizando cualquier pérdida operacional, como esperas debido a la acumulación de camiones o la falta de estos. Para lograrlo, es esencial mantener un flujo constante y controlado de camiones hacia las palas, garantizando que el proceso de carga se realice de manera continua y sin interrupciones en las zonas de carguío.

Una de las principales razones de la congestión que presenta la faena es el sobredimensionamiento de la cantidad de equipos. Para abordar este problema, se ha elaborado la Figura 4.23, la cual permite realizar la asignación óptima de la cantidad de camiones para cada origen y destino, de acuerdo con el tonelaje establecido.

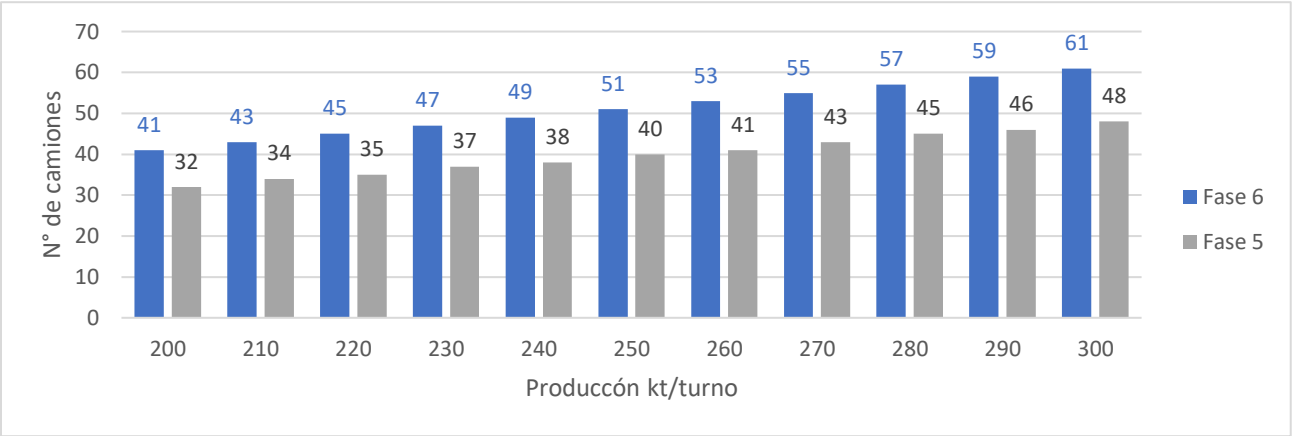


Figura 4.23. Cantidad de camiones según tonelaje.

Del gráfico se desprende que la cantidad de camiones óptimos es, en gran parte de los casos, menor de lo que se tiene en la realidad, lo que genera aumento en los tiempos de ciclos de los camiones por la congestión. Por lo tanto, la recomendación es bajar la cantidad de 62 a 57 camiones en la fase 6. Mientras que a la fase 5 se recomienda bajar la cantidad de 51 a 40 camiones. La Tabla 4.6 que detalla los modelos de equipos de transporte y la cantidad recomendada asignada a cada origen.

Tabla 4.6. Propuesta equipos de transporte según origen.

Fase	Caterpillar - 797 B	Caterpillar - 797 F	Komatsu - 960 E	Komatsu - 980 E-4	N° total Equipos
Fase_1	4	1	3	0	8
Fase_2	3	1	2	0	6
Fase_3	5	2	2	0	9
Fase_4	2	1	1	0	4
Fase_5	30	8	1	1	40
Fase_6	37	19	1	0	57
STK_1	2	1	1	0	4
STK_2	1	1	0	1	3
STK_3	1	0	1	0	2
STK_4	1	1	0	0	2
STK_5	1	1	0	0	2

4.6.2. Regulación de ingreso a la fase 6

El recorrido desde la fase 6 hasta los botaderos presenta tiempos de ciclo elevados, lo cual se puede observar en la Figura 4.24. Esto se debe principalmente a la congestión generada por la interacción constante entre los camiones que transportan carga y aquellos que regresan vacíos

Figura 4.24. Situación inicial del recorrido fase 6 a botaderos.

Para reducir la interacción entre equipos cargados y vacíos, se propone incorporar una nueva ruta, como se muestra en la Figura 4.25. En esta propuesta, los camiones cargados utilizan la ruta indicada en color negro, mientras que los camiones vacíos retornarán por la ruta representada en color morado.

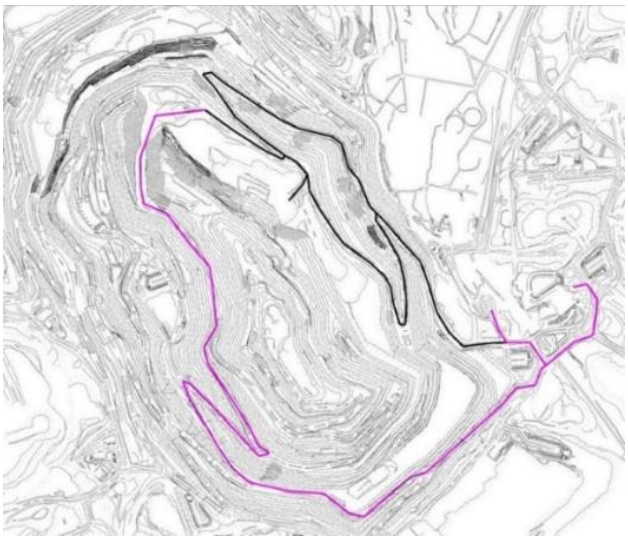


Figura 4.25. Propuesta recorrido fase 6 a botaderos.

La simulación de la ruta nueva arroja una reducción significativa en los tiempos de ciclo de las rutas correspondientes a la fase 6 hacia los botaderos 6 y 1. Esta optimización ha logrado disminuir los tiempos de ciclo en aproximadamente 5 min, lo que contribuye a una mayor eficiencia en el proceso de transporte de material, mejorando la productividad general de la operación.

4.6.3. Diseño de ruta de fase 5 a Chancadores

Con el objetivo de evaluar la situación actual de la ruta desde la fase 5 a los chancadores, se realiza la Figura 4.26 utilizando los datos *GPS* proporcionados por la empresa. En esta figura se observa que los camiones cargados siguen la ruta frente al rajo, ascendiendo por rampas, mientras que los camiones vacíos toman la ruta por la superficie.

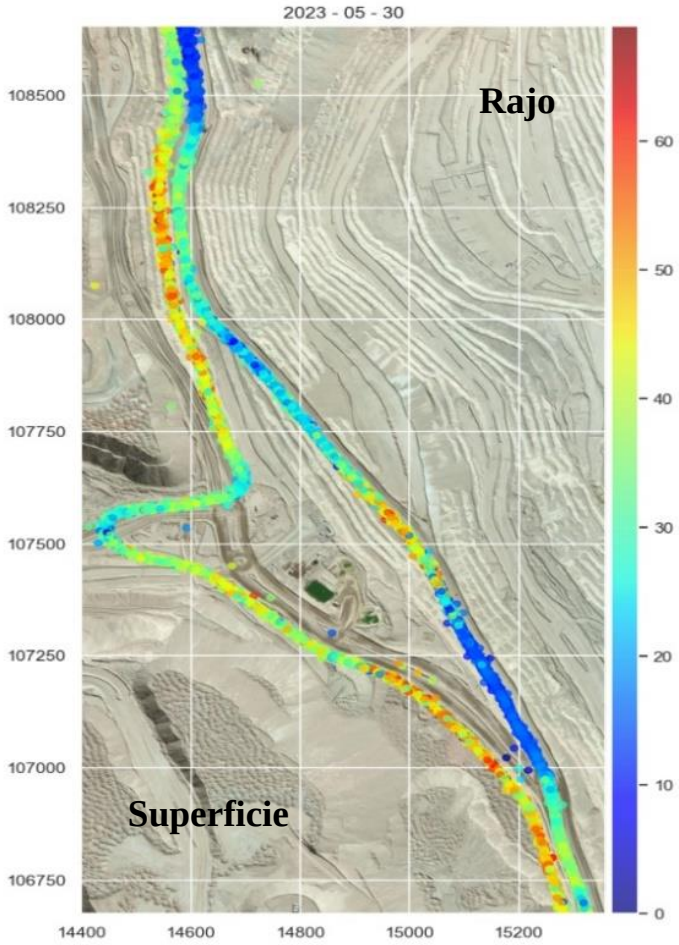


Figura 4.26. Situación inicial del recorrido fase 5 a chancadores.

Una vez realizadas varias simulaciones con distintas configuraciones de recorrido, se identifica que una mejor ruta es que los camiones realicen el camino de forma inversa, es decir, los camiones cargados circulen por la superficie y los camiones vacíos lo hagan frente al rajo. En la Figura 4.27 se presenta la simulación utilizando esta ruta.

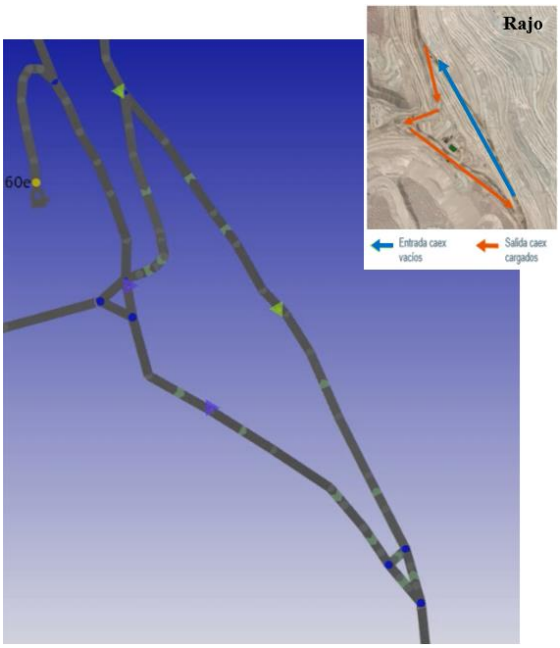


Figura 4.27. Propuesta recorrido fase 5 a chancadores.

Al comparar los tiempos de ciclo obtenidos con el simulador, se observa que la propuesta reduce el tiempo en 1,3 min para ambos chancadores. La ruta propuesta muestra un tiempo de ciclo desde la pala hasta el Chancador 1 de 50,2 min y hasta el Chancador 3 de 49,6 min.

4.6.4. Intersección de fase 1

Al generar la Figura 4.28, la cual corresponde a un mapa de calor de velocidades basado en datos los GPS, se observan frecuentes detenciones en la curva cerrada donde los equipos realizan maniobras de entrada y salida. En promedio, los camiones se detienen 62 veces al día, además hay una pendiente abrupta que reduce la velocidad adquirida en el tramo plano, causando colas y paradas frecuentes.

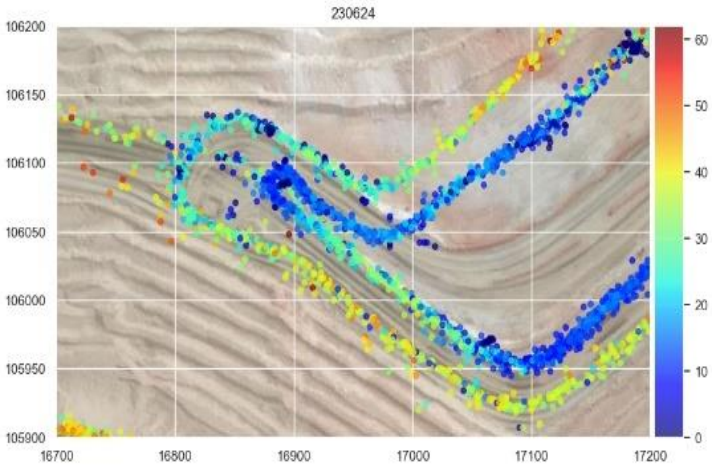


Figura 4.28. Intersección fase 1.

Los camiones vacíos experimentan un tiempo detenido que oscila entre 0,3 min y 0,8 min, mientras que los camiones cargados tienen un tiempo detenido considerablemente mayor, que varía entre 0,5 y 2,1 min. Esta diferencia se debe probablemente a los desafíos adicionales que enfrentan los camiones cargados, como mayor peso y la necesidad de maniobras más cuidadosas.

Adicionalmente, el análisis de las imágenes satelitales revela la existencia de un pretil que no cumple con los estándares, lo cual provoca que el camino sea angosto, dificultando así el viraje de los camiones, especialmente cuando están cargados. A partir de estos hallazgos, se recomienda estilizar el pretil y ensanchar la curva.

La implementación de esta mejora reduce los tiempos de ciclo y de viaje de los camiones que se desplazan desde la fase 1 hasta botadero 1 en 3,3 min.

4.6.5. Mejora en cruce fase 2 y fase 3

Mediante el análisis de datos *GPS*, se ha detectado que los camiones cargados se detienen durante un tiempo considerable en la zona de la curva. Según los datos recopilados, los camiones se detienen en promedio 80 veces al día. Además, se tiene una subida abrupta que causa la pérdida de la velocidad adquirida en el tramo plano, generando colas y detenciones. El mapa de calor de las velocidades se presenta en la Figura 4.29.

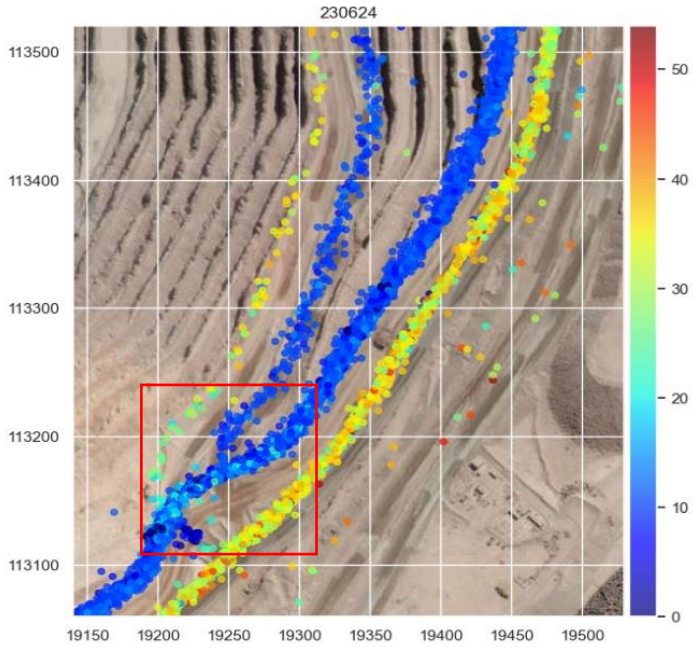


Figura 4.29. Cruce fase 2 y fase 3.

Los camiones vacíos suelen experimentar un tiempo de detención que varía entre 0,2 min y 0,7 min. Por otro lado, los camiones cargados enfrentan un tiempo de detención significativamente mayor, que oscila entre 1,0 min y 2,7 min. Esta diferencia se debe a las posibles restricciones operacionales y logísticas que afectan a los camiones cuando están llenos.

Al analizar el trazado del camino, se observa la presencia de una curva (demarcada con rojo en la Figura 4.29) que puede ser eliminada al rectificar el camino.

Las simulaciones demuestran que la rectificación del camino permite aumentar la velocidad de los vehículos cargados que ingresan desde otros sectores. Los camiones que se dirigen desde la parte inferior de la rampa deberán detenerse, liberando así la vía. Las simulaciones indican que los tiempos de ciclo y de viaje de los camiones que salen de la fase 3 se reducirán con esta mejora, logrando una mejora aproximada de 0,7 min.

5. Resultado simulación con las propuestas de mejoras implementadas

Una vez implementadas todas las propuestas de mejora mencionadas anteriormente, los resultados de la simulación se presentan en la Tabla 5.1, la cual detalla los tiempos de ciclo determinísticos y estocásticos obtenidos. En Anexos 2 se presentan los gráficos de los tiempos de ciclo para cada origen.

Tabla 5.1. Tiempos de ciclo finales.

Origen	Destino	Tiempo de ciclo Plan min	Tiempo de ciclo Real min	Tiempo de ciclo Det min	Tiempo de ciclo Est min
Fase_1	BOT_1	40,4	55,4	38,9	47,2
Fase_1	CH_1	31,4	39,9	25,4	32,0
Fase_1	CH_3	37,7	39,7	25,0	38,3
Fase_1	CH_4	60,3	71,1	56,5	61,8
Fase_1	STK_1	36,0	39,5	29,2	36,0
Fase_1	STK_3	41,1	74,2	35,1	44,3
Fase_1	STK_6	37,7	50,1	32,4	41,7
Fase_2	CH_5	57,2	62,7	44,9	57,5
Fase_3	BOT_2	30,1	37,0	26,1	31,3
Fase_3	BOT_7	38,0	47,3	29,4	41,3
Fase_4	BOT_3	40,1	45,3	34,9	43,2
Fase_5	BOT_4	42,1	58,8	39,6	42,7
Fase_5	BOT_5	37,9	53,1	35,6	38,2
Fase_5	CH_1	49,4	74,4	47,0	50,2
Fase_5	CH_3	49,5	70,4	46,6	49,6
Fase_5	CH_4	79,5	95,5	77,1	79,9
Fase_5	STK_1	53,9	73,2	50,8	54,3
Fase_5	STK_3	54,0	75,3	51,0	54,4
Fase_5	STK_7	58,1	69,7	56,5	59,0
Fase_5	STK_5	41,3	60,0	38,2	42,1
Fase_6	BOT_6	60,3	69,5	50,5	62,6
Fase_6	BOT_1	79,4	98,2	69,8	80,2
Fase_6	CH_1	50,2	55,0	40,7	51,2
Fase_6	CH_3	53,3	62,2	41,5	54,1
Fase_6	CH_4	83,2	92,7	71,0	85,7
Fase_6	STK_1	55,2	65,1	45,7	58,0
Fase_6	STK_3	67,6	80,9	51,6	65,2
Fase_6	STK_8	79,3	98,2	66,9	81,3
Fase_6	STK_7	64,2	73,0	51,8	65,1
Fase_6	STK_6	54,0	68,1	48,0	62,6
Fase_6	STK_9	81,0	99,1	75,0	83,7
STK_1	CH_1	24,4	29,8	16,2	27,6
STK_1	CH_3	23,6	27,8	15,4	26,5
STK_1	CH_5	45,2	58,8	33,3	50,7
STK_2	CH_5	17,2	41,2	13,7	36,4
STK_3	CH_4	37,0	67,4	34,0	46,5
STK_4	CH_2	21,0	28,6	13,2	23,0
STK_5	CH_2	20,7	29,8	13,9	25,7

En el análisis de operaciones mineras, la evaluación de los tiempos de ciclo es crucial para entender la eficiencia y productividad de los equipos. Tal como se menciona anteriormente, los tiempos de ciclo estocásticos consideran la interacción entre equipos, proporcionando una visión más realista del desempeño operativo en comparación con los tiempos deterministas. Por lo tanto, al comparar los tiempos de ciclo estocásticos de la situación inicial (Tabla 4.5) con aquellos obtenidos tras la implementación de todas las propuestas (Tabla 5.1), se observa que todos disminuyen.

La Figura 5.1 compara para cada fase los tiempos de ciclo estocásticos iniciales con los tiempos de ciclo estocásticos tras la implementación de las mejoras propuestas.

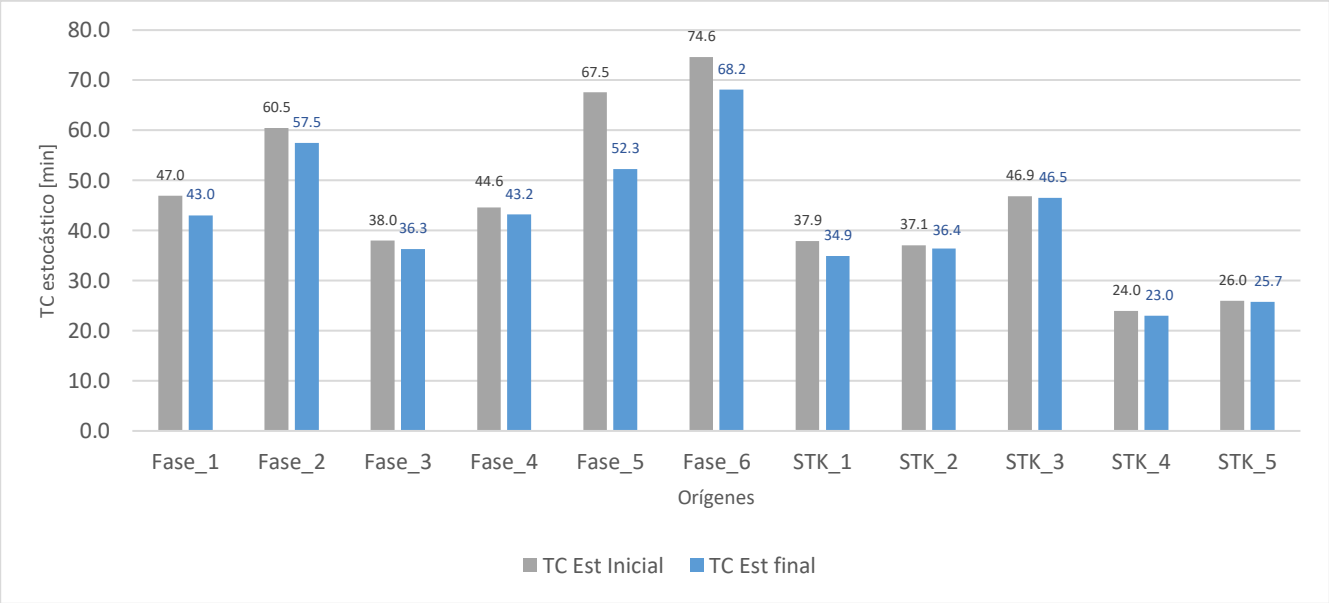


Figura 5.1. Comparación tiempos de ciclo estocásticos, situación inicial y final.

Para simplificar la visualización de la mejora, se presenta la Figura 5.2, que muestra la disminución generada obtenida de los tiempos de ciclo estocásticos.

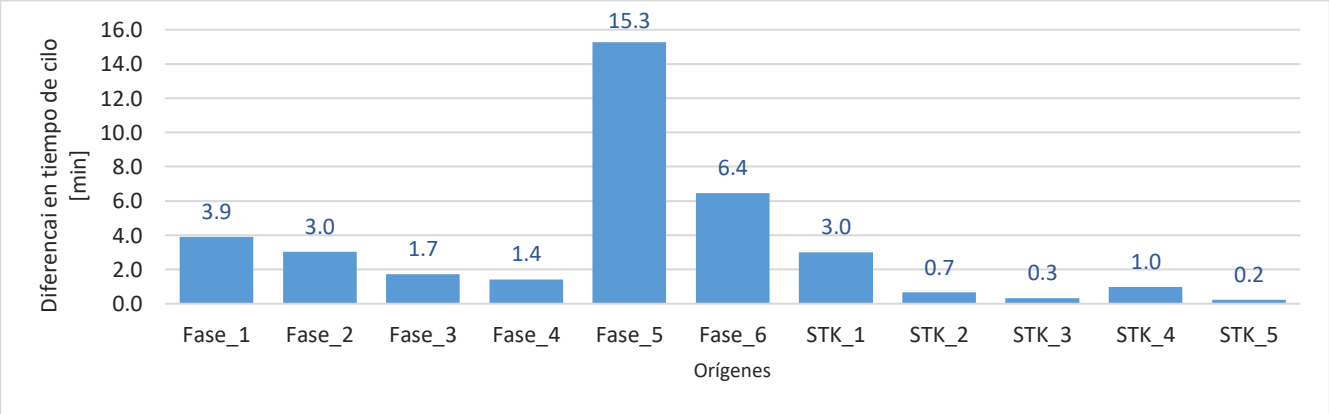


Figura 5.2 Diferencia ganada de tiempo de ciclo estocástico.

En todas las fases se observa una tendencia hacia la mejora de la eficiencia operativa. A continuación, se categorizarán en tres grupos:

- Mejoras significativas: En esta categoría se encuentran las fases que han experimentado una disminución significativa en sus tiempos de ciclo, lo que demuestra que las mejoras aplicadas han sido muy efectivas, con una reducción de más de 3 min. Estos orígenes son: fase 1, fase 2, fase 5 y fase 6.
- Mejoras moderadas: Esta categoría abarca los equipos que han experimentado una disminución menor a 3 min y mayor a 1 min en sus tiempos de ciclo. Estos orígenes son: fase 3, fase 4, y stock 1.
- Mejoras menores: En esta categoría se agrupan los equipos que han registrado reducciones menores a 1 min en los tiempos de ciclo. Aunque la tendencia general es positiva, el impacto es limitado y sugiere que se necesitan ajustes o intervenciones adicionales para alcanzar mejoras más significativas. Estor orígenes son: stock 2, stock 3, stock 4 y stock 5.

En resumen, el análisis revela una mejora generalizada en la eficiencia operativa a través de todas las fases, debido a la disminución de los tiempos de ciclo. Se recomienda un enfoque continuo de monitoreo y ajuste para maximizar la eficiencia en todas las fases.

A continuación, en la Figura 5.3 se presenta la diferencia relativa en los tiempos de ciclo estocásticos entre la simulación inicial y la simulación final.

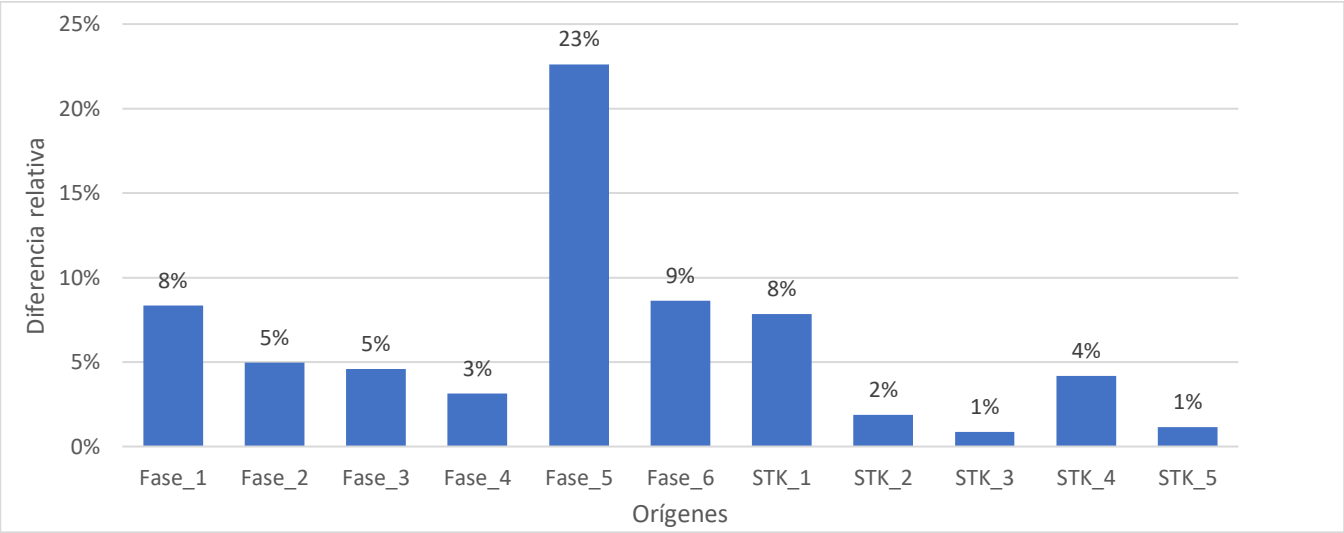


Figura 5.3. Diferencia relativa tiempos de ciclo estocásticos.

El gráfico muestra la diferencia relativa en los tiempos de ciclo entre la simulación inicial y la simulación final, destacando una mayor reducción en Fase 5 con aproximadamente un 23%. Fase 1 y Fase 6 también muestran reducciones notables, cercanas al 8% y 9%, respectivamente. En Fase 4, la diferencia es menor, lo que sugiere una menor efectividad en las mejoras implementadas. Los stocks presentan diferencias más pequeñas, siendo stock 1 el más impactado con una reducción cercana al 8%. Por lo tanto, se deduce que las mejoras fueron más efectivas en las fases que en los stocks.

La disminución de los tiempos de ciclo permite que la operación minera procese mayor volumen de material en el mismo período, aumentando así la productividad y mejorando la rentabilidad del proceso minero. Esto se refleja al reemplazar la ecuación (5) en la ecuación (4), obteniendo la Ecuación (6).

$$Productividad\left(\frac{t}{día}\right) = \frac{Tiempo\ nominal(h) \cdot 60\left(\frac{min}{h}\right) \cdot \frac{disponibilidad}{100} \cdot \frac{utilización}{100}}{Tiempo\ de\ \ ciclo\ (\mathrm{min})} \cdot Payload \cdot N° \ de\ camiones \qquad (6)$$

La fórmula anterior es aplicada tanto para la fase inicial como para la final, utilizando la cantidad de camiones especificada en la Tabla 4.3 y Tabla 4.6, respectivamente, en conjunto con la Tabla 5.2 , que tiene los parámetros operacionales según modelo de equipo de transporte.

Tabla 5.2. Parámetros operaciones de los equipos de transporte.

Caex	Payload	Utilización	Disponibilidad
Caterpillar 797 B	363	81,0%	79,5%
Caterpillar 797 F	363	82,0%	78,2%
Komatsu 960 E	326.59	81,0%	81,5%
Komatsu 980 E-4	369.41	79,0%	78,8%

Obteniéndose así la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Productividad inicial y final.

Fase	Productividad situación inicial ktpd	Productividad final ktpd	Diferencia absoluta ktpd	Diferencia relativa %
Fase_1	55,6	60,7	5.1	9%
Fase_2	32,5	34,2	1.7	5%
Fase_3	78,2	81,9	3.7	5%
Fase_4	29,6	30,5	0.9	3%
Fase_5	252,3	256,8	4.5	2%
Fase_6	278,7	280,7	2	1%
STK_1	34,8	37,8	3	9%
STK_2	27,1	27,5	0.4	1%
STK_3	13,8	13,9	0.1	1%
STK_4	28,0	29,2	1.2	4%
STK_5	25,9	26,1	0.2	1%
Total	856	879	23	3%

Se tiene que, para todos los orígenes, la productividad aumentó en 23,0 ktpd, lo que corresponde a una diferencia relativa del 3% con respecto a la situación inicial. Para más detalle en la Figura 5.4 se presenta la diferencia resultante entre la productividad final y la productividad de la situación inicial para los diferentes orígenes.

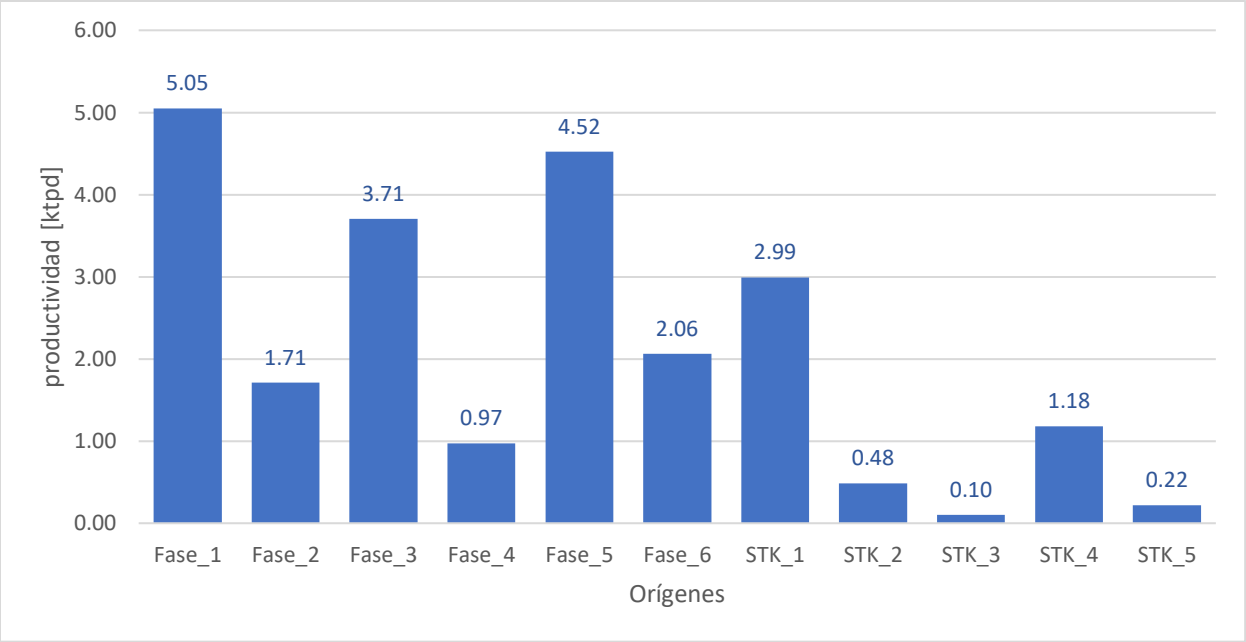


Figura 5.4. Productividad ganada una vez implementadas las mejoras.

Del gráfico se destaca un aumento significativo en la productividad de la fase 1, seguida de la fase 5 y fase 6. Orígenes como stock 2 y stock 5 muestran mejoras menores, mientras que stock 3 presenta la ganancia más baja. En general, las fases con mayor producción inicial experimentaron aumentos notables, lo que sugiere un impacto positivo de las mejoras implementadas.

6. Conclusiones y recomendaciones

La estimación de los tiempos de ciclo de los equipos de transporte es crucial para asegurar el cumplimiento de las metas productivas. Por ello, se deben desarrollar metodologías que permitan estimar con precisión estos tiempos y garantizar una adecuada asignación de los equipos. En este sentido, al modelar el caso de un rajo abierto utilizando el simulador *HaulSim*, se obtuvieron los tiempos de ciclo tanto determinísticos como estocásticos de los equipos de transporte, identificando que los tiempos estocásticos son más realistas, ya que los determinísticos son la capacidad de diseño, la cual es difícil de lograr en la realidad.

Además, la simulación fue clave para identificar los principales cuellos de botella y áreas de congestión dentro de la operación minera. A través de los tiempos de ciclo obtenidos del simulador, se detectaron los sectores con mayores demoras, evaluando de manera precisa las áreas con mayor congestión. Estas se manifestaron principalmente en las fases 5, 6 y 1, donde el tráfico de camiones se acumulaba, afectando significativamente los tiempos de ciclo. La capacidad del simulador para replicar las condiciones reales permitió no solo cuantificar estos problemas, sino también proponer mejoras para optimizar el proceso de transporte.

La implementación de estas mejoras, tales como la reducción de la cantidad de camiones, la regulación del ingreso a las fases críticas y el rediseño de rutas resultó en una disminución de los tiempos de ciclo estocásticos en todas las fases, incrementando así la productividad de la operación. Las fases que mostraron mayores reducciones en los tiempos de ciclo fueron: fase 5 con una disminución de 15,3 min, fase 6 con 6,4 min, fase 1 con 3,9 min y fase 2 con 3 min, lo que condujo a un aumento de la productividad de estas fases en 13,34 ktpd. Estos resultados demuestran la efectividad de las mejoras y resaltan la importancia de las herramientas de simulación estocástica para la optimización de las operaciones mineras.

Otro aspecto importante fue la validación del modelo mediante la comparación de los tiempos de ciclo del simulador con los tiempos reales proporcionados por la empresa. Esto permite confirmar que el modelo refleja con precisión las condiciones operativas reales de la faena. Durante el proceso de calibración, se ajustaron parámetros clave, como los límites de velocidad por tramo y las rutas de transporte, asegurando que los tiempos simulados convergieran con los tiempos observados en la operación diaria. Esta correspondencia entre los tiempos reales y los estocásticos confirmó que el modelo es una herramienta eficaz para gestionar las incertidumbres y fluctuaciones operativas.

En relación con el objetivo principal de este estudio, que buscaba mejorar los tiempos de ciclo de los camiones utilizando un simulador estocástico, se demostró que la metodología propuesta identifica con mayor exactitud los factores que incrementan los tiempos de ciclo, tales como la congestión en rutas específicas, ineficiencias en el uso de la flota y demoras inesperadas en los tiempos de carga y descarga. Los resultados reflejaron una reducción significativa en los tiempos de ciclo, validando no solo la capacidad del simulador para replicar fielmente las condiciones operativas, sino también su utilidad como herramienta estratégica en la planificación de operaciones mineras.

Finalmente, la capacidad del simulador estocástico *HaulSim* de capturar la variabilidad y las incertidumbres inherentes al proceso de transporte minero fue crucial para alcanzar estos resultados. Al simular múltiples escenarios con diferentes configuraciones de flota y rutas, se propusieron soluciones óptimas que no habrían sido evidentes con métodos determinísticos. Este enfoque permitió mejorar tanto la eficiencia operativa como la productividad, incrementando el tonelaje diario transportado sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del proceso.

La metodología aplicada en este estudio no solo es aplicable a la faena en cuestión, sino también puede ser adaptada a otras operaciones mineras que enfrenten desafíos similares, lo que subraya su valor en la planificación y gestión de operaciones mineras.

6.1. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda profundizar en el análisis de otros factores que afectan los tiempos de ciclo, como las condiciones climáticas. Además, sería beneficioso explorar la integración equipos autónomos, lo que podrían reducir aún más los tiempos de ciclo y mejorar la seguridad operativa. Finalmente, se sugiere la realización de estudios comparativos entre diferentes herramientas de simulación para evaluar la efectividad de cada *software* en diversos contextos operacionales.

7. Referencias

Aste, E. (2012). *Desarrollo de un método heurístico para la generación de programas mineros de corto plazo en minería de cobre a cielo abierto.* Santiago de Chile.

Australian Government. (2010). *Analyses of Diesel Use for Mine Haul and Transport Operations.*

Banks, J. (1999). *Discrete Event Simulation.*

Cochilco. (2022). *Indicadores de productividad de la minería del cobre en Chile.*

GMG. (2020). *A Standarized Time Classification Framework for Mobile Equipment in Surface Mining: Operational Definitions, Time Usage Model and Key Performance Indicators.*

González, H. (2017). *Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un plan de producción en minería a cielo abierto.* Santiago de Chile.

He, Z., Li, Z., & Giua, A. (2016). *Cycle Time Optimization of Deterministic Timed Weighted Marked Graphs by Transformation.*

Henríquez, D. (2019). *Evaluación del límite óptimo entre minería cielo abierto y sublevel stoping.* Santiago de Chile.

Inacap. (2016). *Extracción mina II : Apuntes carguío y transporte.*

Martinez, E. (2019). *Mejoramiento de producción del carguío y transporte mediante la teoría de colas en Compañía Minera Los Andes Perú Gold SAC.* Huancayo.

Martinez, R. (2020). *Determinación de flotas de equipos.*

Nube Minera. (Agosto de 2022). *Elementos de diseño de un rajo*. Obtenido de https://nubeminera.cl/elementos-rajo/

Ortiz, J. (2008). *Generalidades acerca del manejo de minerales.*

Ortiz, O., Canchari, G., & Igle, S. (2007). *Simulación determinística y estocástica para dimensionar.*

Portal Minero. (2006). *Manual general de minería y metalurgia.*

Proth, J.-M., & Xie, X.-L. (1994). *Cycle time of stochastic event graphs: evaluation and marking optimization.*

RPM Global. (2023). *HaulSim*. Obtenido de https://rpmglobal.com/es/product/haulsim/

Sernageomin. (2018). *Guía 4 de operación para la pequeña minería: Perforación y tronaduras.*

Torkamani, E. (2013). *A linkage of truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete-event simulation.*

8. Anexos

Anexos 1. Tiempos de ciclo por fase (inicial)

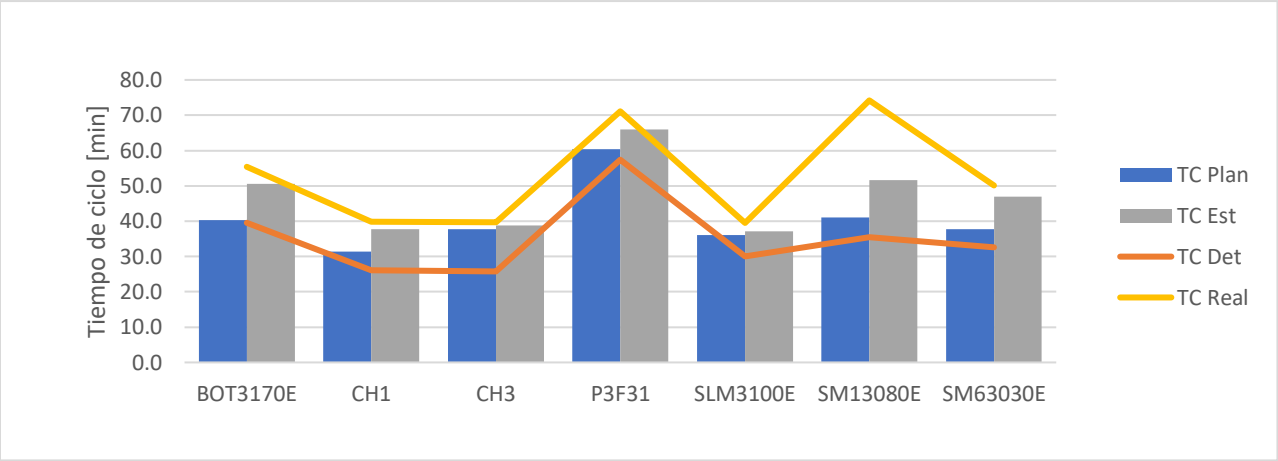


Figura 8.1. Tiempos de ciclo Fase 1 (inicial).

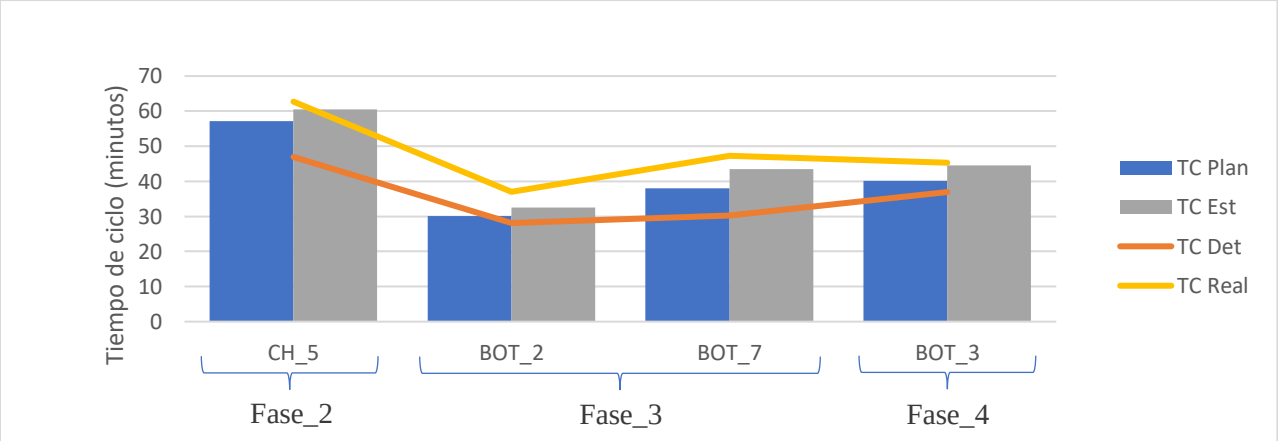


Figura 8.2. Tiempos de ciclo Fases 2, 3 y 4 (inicial).

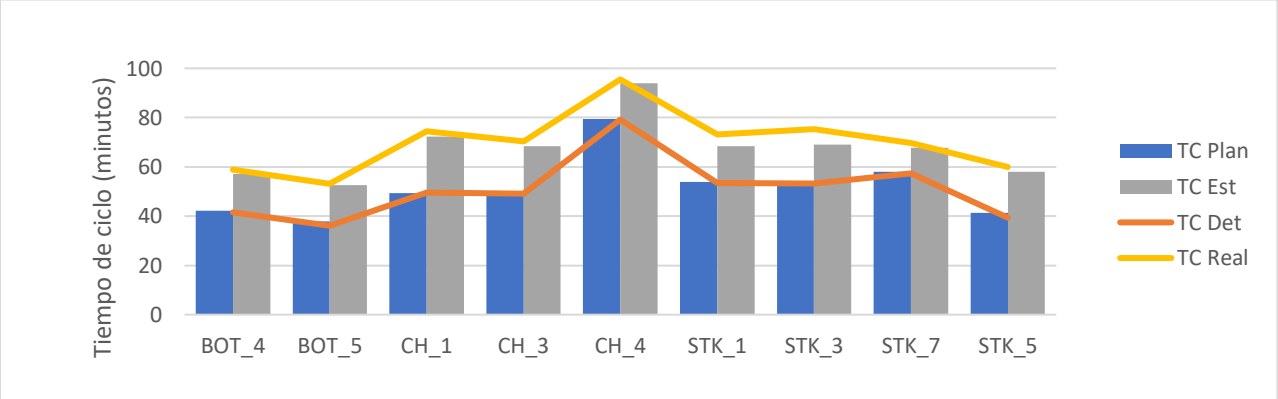


Figura 8.3. Tiempos de ciclo Fase 5 (inicial).

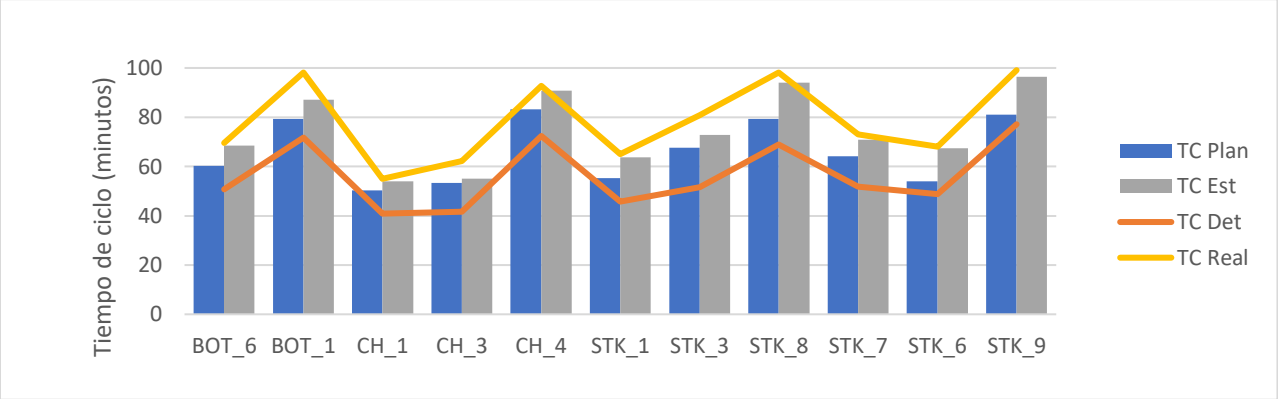


Figura 8.4.Tiempos de ciclo Fase 6 (inicial).

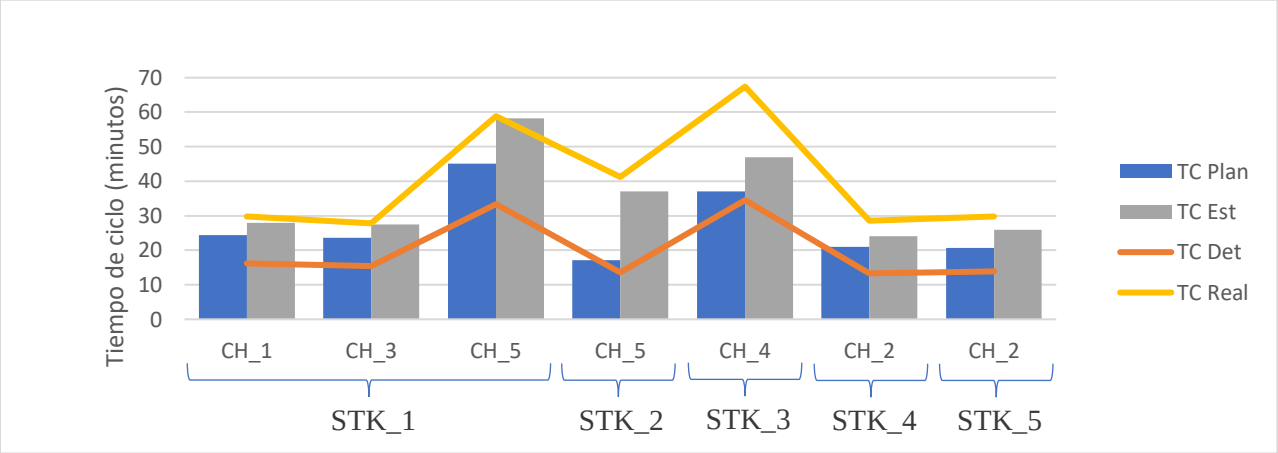


Figura 8.5. Tiempos de ciclo Stocks (inicial).

Anexos 2. Tiempos de ciclo por fase (final)

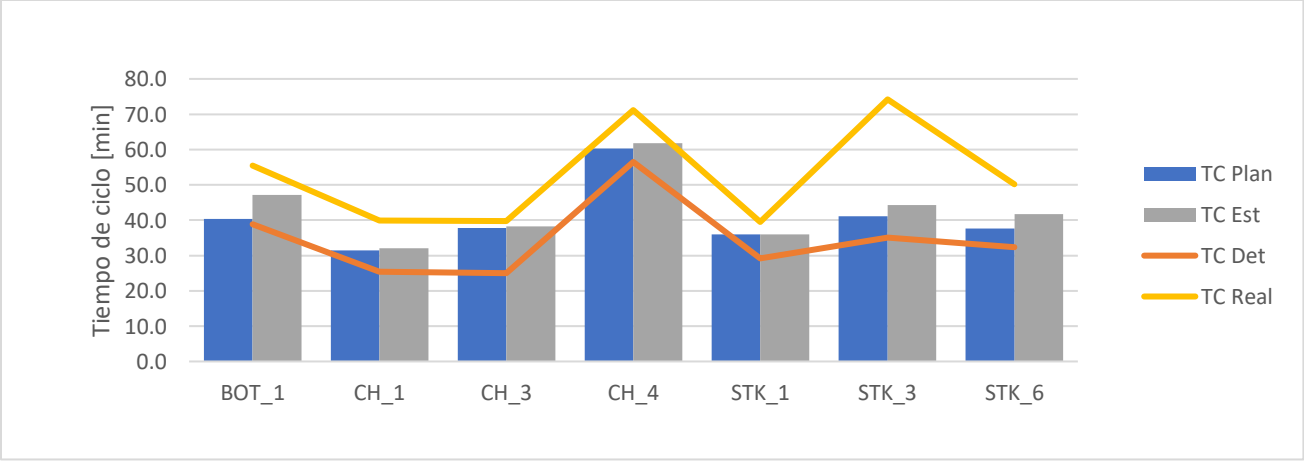


Figura 8.6.Tiempos de ciclo Fase 1 (final).

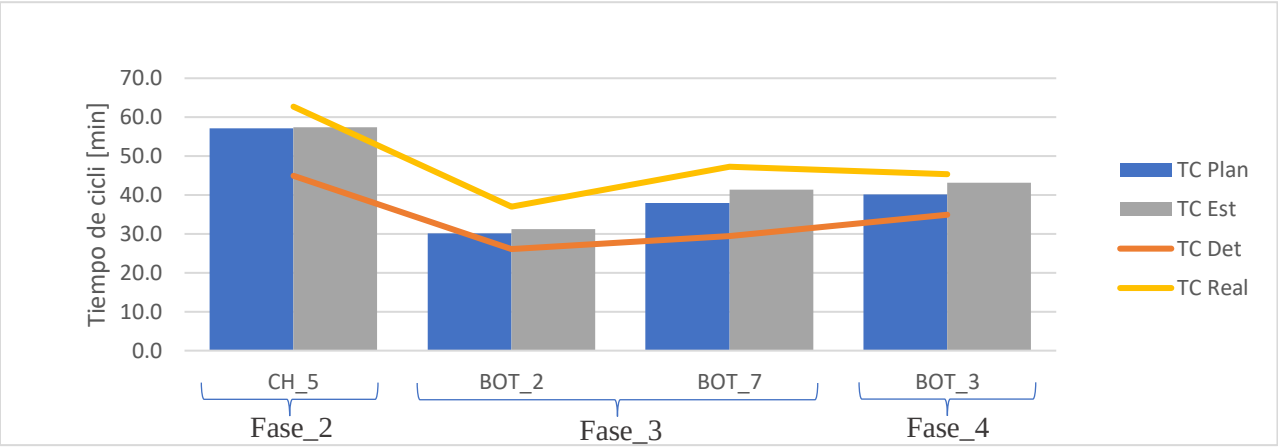


Figura 8.7.Tiempos de ciclo Fases 2, 3 y 4 (final).

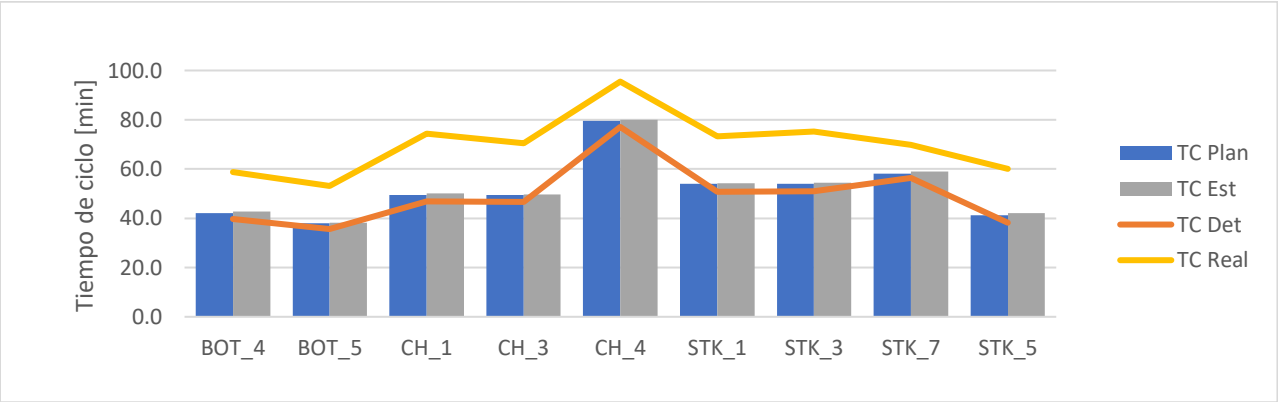


Figura 8.8.Tiempos de ciclo Fase 5 (final).

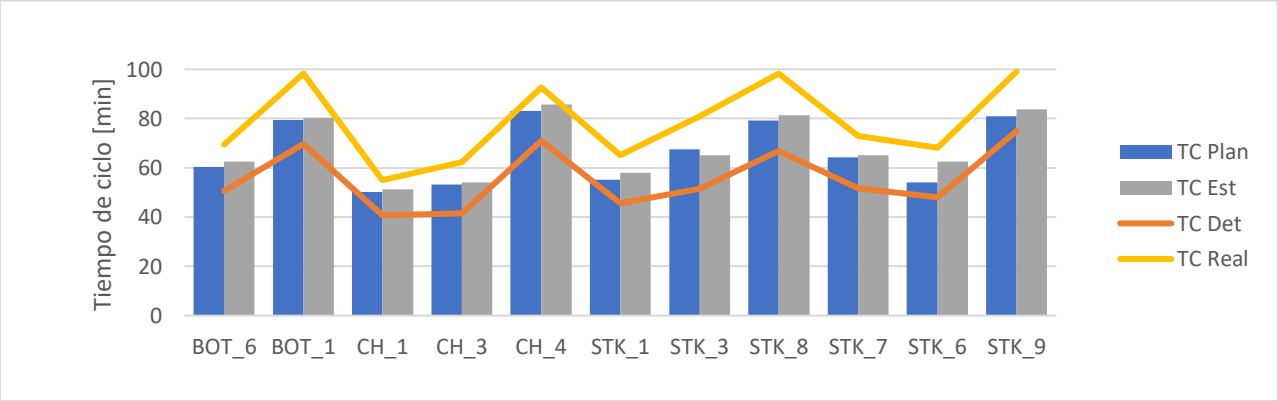


Figura 8.9.Tiempos de ciclo Fase 6 (final).

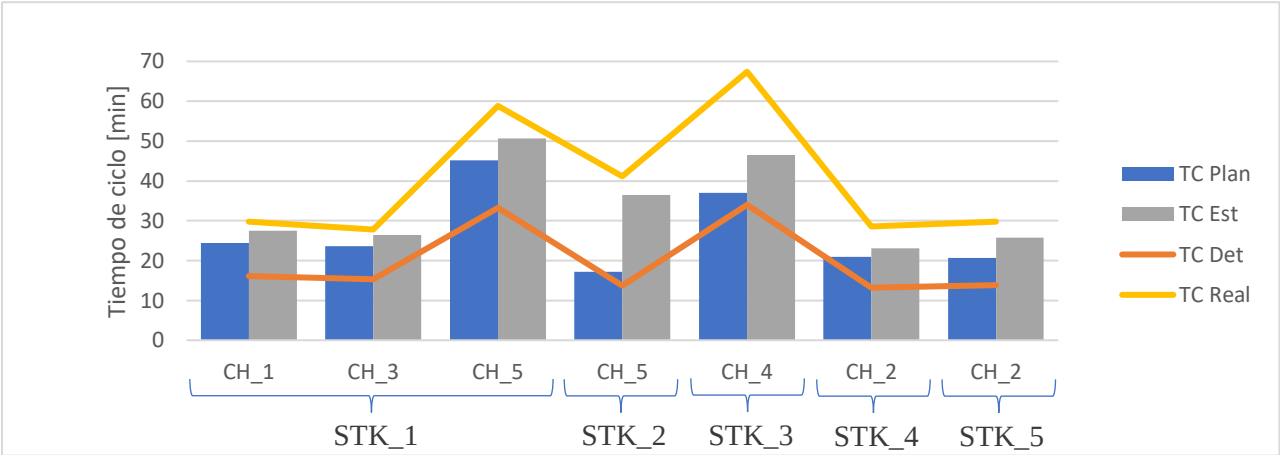


Figura 8.10.Tiempos de ciclo Stocks (final).