

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO
MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS PARA
REDUCIR DEMORAS OPERATIVAS Y COSTOS EN UNA MINA
SUPERFICIAL DEL CENTRO DEL PERÚ EN EL 2024**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR:

Nick Humberto Flores Zárate

ASESOR:

Mgt. Mario Fernando Cedrón Lassus

Lima, 2026

Informe de similitud

Yo, Mario Fernando Cedrón Lassus, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada:

“OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS PARA REDUCIR DEMORAS OPERATIVAS Y COSTOS EN UNA MINA SUPERFICIAL DEL CENTRO DEL PERÚ EN EL 2024”


Del autor:

Nick Humberto Flores Zárate,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 7 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 15/02/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 16 de febrero de 2026

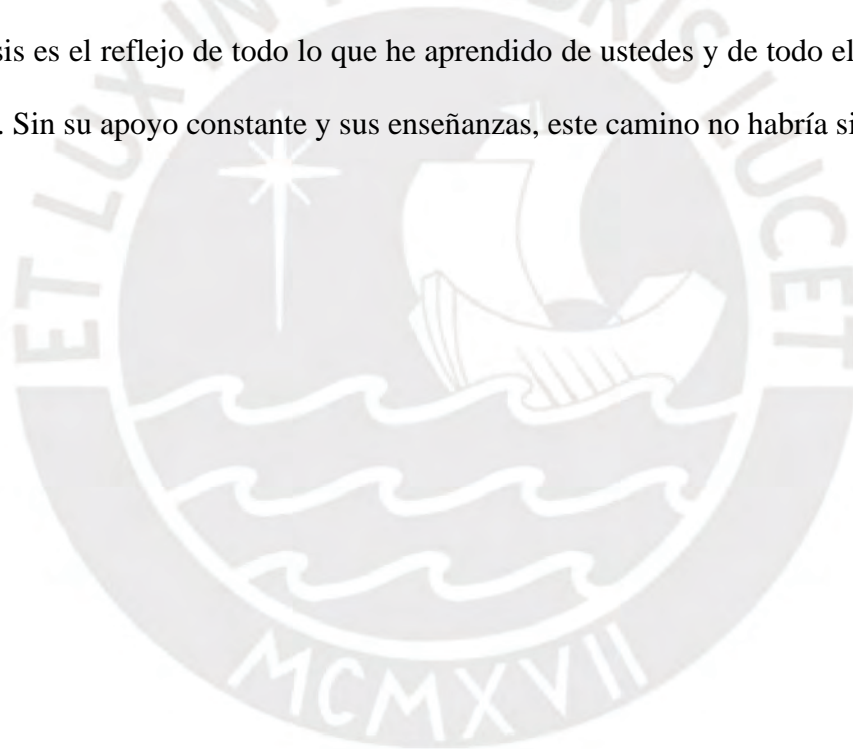
| | |
|---|---|
| Apellidos y nombres del asesor: Mgt. Mario Fernando Cedrón Lassus | |
| DNI: 08801853 | Firma:  |
| ORCID: 0000-0002-3342-2838 | |

Dedicatoria

A mi mamá, por ser la guía y la fuerza que me acompaña cada día. Gracias por tus sacrificios, por cada esfuerzo y por enseñarme, desde pequeño, el valor de la responsabilidad y la importancia de siempre terminar lo que comienzo. Has sido mi ejemplo más grande de constancia y amor incondicional, y todo lo que he logrado es gracias a ti.

A mis abuelos, quienes me inculcaron los valores que hoy guían mi vida. Gracias por enseñarme que el esfuerzo y la integridad son las bases para lograr cualquier sueño, y que el amor es el motor que hace posible alcanzar lo imposible. A ustedes, que han sido mi inspiración y mi soporte, les dedico todos mis logros con profunda gratitud.

Esta tesis es el reflejo de todo lo que he aprendido de ustedes y de todo el amor que me han brindado. Sin su apoyo constante y sus enseñanzas, este camino no habría sido posible.



Resumen

La eficiencia del sistema de carguío y acarreo es determinante para la productividad y los costos en minería a cielo abierto. Esta investigación evalúa la optimización de dicho sistema en una mina superficial del centro del Perú (2024), empleando simulación de eventos discretos para reducir demoras operativas y mejorar el desempeño económico. El estudio, de nivel aplicado y enfoque explicativo–proyectivo, analizó los tiempos de operación de nueve camiones volquete mediante observación directa y procesamiento estadístico, integrando los datos en un modelo desarrollado en GPSS.

Los resultados mostraron una alta variabilidad en los ciclos y congestión en los puntos de carguío y descarga, factores que limitan la productividad real a 2,769 TM/10 h, por debajo de la meta de 2,800 TM/10 h. La simulación evidenció que una flota optimizada de 12 camiones alcanza 2,886 TM/10 h, cumpliendo el plan en 32 días y reduciendo el costo unitario al eliminar tiempos de espera y subutilización de equipos. El modelo fue validado con diferencias menores al 5% frente a los datos reales, confirmando su consistencia. Asimismo, el análisis de sensibilidad identificó al número de camiones y la velocidad de transporte como las variables más influyentes en la productividad.

En conjunto, la optimización del sistema de gestión basado en simulación permite estabilizar el ciclo operativo, cumplir las metas de producción y reducir el costo por tonelada transportada, consolidando una operación más eficiente y confiable.

Palabras clave: Simulación de eventos discretos, carguío y acarreo, productividad, optimización de flota, costos operativos.

Abstract

Efficient management of loading and hauling systems is essential for maintaining productivity and controlling operating costs in open-pit mining. This study focuses on optimizing these processes in a surface mine located in central Peru during 2024, using discrete-event simulation to reduce operational delays and improve economic performance. The research follows an applied, explanatory–projective design and analyzes operational data from a fleet of nine haul trucks collected through direct observation and statistical processing, which were integrated into a GPSS simulation model.

The results revealed significant variability in cycle times and congestion at loading and dumping points, limiting real productivity to 2,769 t per 10-hour shift—below the operational target of 2,800 t. Simulation outcomes showed that an optimized fleet of 12 trucks increases productivity to 2,886 t per 10 hours, meeting the monthly production plan within 32 days while reducing the unit cost per ton by eliminating queue-related delays and equipment underutilization. Model validation demonstrated deviations under 5% when compared with real field data, confirming its reliability. Additionally, sensitivity analysis identified the number of trucks and haulage speed as the most influential variables in system performance.

Overall, the optimization of the management system supported by simulation contributes to stabilizing the operational cycle, meeting production targets, and reducing the cost per ton hauled, thereby strengthening the efficiency and reliability of the operation.

Keywords: Discrete-event simulation, loading and hauling, fleet optimization, operational delays, mining costs.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Capítulo I Planteamiento del Problema | 2 |
| 1.1 Descripción del Problema | 2 |
| 1.2 Formulación del Problema | 3 |
| 1.2.1 Problema General. | 3 |
| 1.2.2 Problemas Específicos. | 3 |
| 1.3 Objetivos de la Investigación..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos. | 3 |
| 1.4 Justificación e Importancia de la Investigación | 4 |
| 1.4.1 Justificación. | 4 |
| 1.4.2 Importancia. | 4 |
| 1.5 Limitaciones del Estudio..... | 4 |
| 1.6 Delimitación de la Investigación..... | 4 |
| 1.6.1 Delimitación Temporal..... | 4 |
| 1.6.2 Delimitación Espacial..... | 4 |
| Capítulo II Marco Teórico Conceptual | 5 |
| 2.1 Antecedentes de la Investigación..... | 5 |
| 2.1.1 Antecedentes Internacionales | 5 |
| 2.1.2 Antecedentes Nacionales..... | 6 |
| 2.2 Bases Teóricas o Científicas | 8 |
| 2.2.1 Minería a cielo abierto..... | 8 |
| 2.2.2 Etapas del minado..... | 9 |
| 2.2.3 Productividad óptima..... | 10 |
| 2.2.4 Cálculo de la productividad de equipos de transporte..... | 11 |
| 2.2.5 Costos en minería. | 13 |
| 2.2.6 Indicadores de desempeño (KPIS) para el acarreo y transporte..... | 15 |
| 2.2.7 Elementos para el estudio de tiempos. | 18 |
| 2.2.8 Tiempos de equipo y maquinaria. | 19 |
| 2.2.9 Metodología Six Sigma. | 19 |
| 2.2.10 Procedimiento de la metodología Sigma..... | 20 |
| 2.2.11 Sistema Dispath..... | 21 |
| 2.2.12 Algoritmo del Sistema Dispatch..... | 23 |
| 2.2.13 Sistema ControlSense..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 2.2.14 Sistema Ramp Mem. | 31 |
| 2.2.15 Sistema DSS. | 32 |
| 2.2.16 Sistema Tooth Metrics. | 32 |
| 2.2.17 Norma Glencore. | 33 |
| 2.2.18 Factores que afectan el rendimiento del equipo de carguío. | 35 |
| 2.2.19 Factores que afectan el proceso de carguío y acarreo. | 36 |
| 2.3 Definición de términos básicos | 37 |
| Capítulo III Hipótesis y Variables | 39 |
| 3.1 Hipótesis General. | 39 |
| 3.2 Hipótesis Específicas | 39 |
| 3.3 Variables de Estudio | 39 |
| 3.3.1 Variable Independiente. | 39 |
| 3.3.2 Variable Dependiente. | 39 |
| Capítulo IV Método de la Investigación | 40 |
| 4.1 Tipo y Nivel de la Investigación | 40 |
| 4.1.1 Tipo de la Investigación. | 40 |
| 4.1.2 Nivel de Investigación. | 41 |
| 4.2 Población y Muestra de la Investigación | 41 |
| 4.2.1 Población. | 41 |
| 4.2.2 Muestra. | 42 |
| 4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos | 43 |
| 4.3.1 Técnicas. | 43 |
| 4.3.2 Instrumentos. | 43 |
| Capítulo V Resultados | 44 |
| 5.1 Causas fundamentales que ocasionan las demoras operativas y tiempos muertos. | 44 |
| 5.2 Modelo six sigma en base al modelo DMAIC | 50 |
| 5.2.1 Definir. | 51 |
| 5.2.2 Medir. | 54 |
| 5.2.3 Analizar. | 70 |
| 5.2.4 Mejorar | 75 |
| 5.2.5 Controlar. | 81 |
| 5.2.6 Definición de escenarios (Base vs Propuesto). | 83 |
| 5.2.7 Evaluación del lucro cesante por incumplimiento del plan. | 84 |
| Capítulo VI Validación | 86 |

| | |
|---|-----|
| 6.1 Fundamentación de la validación..... | 86 |
| 6.1.1 Datos utilizados para la validación..... | 86 |
| 6.1.2 Comparación cuantitativa entre datos reales y simulados..... | 90 |
| 6.1.3 Consistencia de planificación (TM/10 h vs. días de calendario)..... | 92 |
| 6.2 Análisis de sensibilidad..... | 92 |
| 6.3 Plan de Control Logístico..... | 95 |
| Conclusiones..... | 98 |
| Recomendaciones..... | 99 |
| Referencias Bibliográficas..... | 100 |
| Anexos..... | 103 |



Índice de Tablas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | División de los factores del tiempo | 12 |
| Tabla 2 | Cálculo de productividad de equipos mixtos..... | 13 |
| Tabla 3 | Operacionalización de variables | 39 |
| Tabla 4 | Causas y análisis en base a la unidad minera superficial | 48 |
| Tabla 5 | Esquema de tiempos Unidad minera superficial | 51 |
| Tabla 6 | Tiempos de carguío de 5 volquetes | 51 |
| Tabla 7 | Tiempos, Promedio y desviación estándar | 53 |
| Tabla 8 | Tiempo Operando Efectivo Excavadora EC380 | 54 |
| Tabla 9 | Parámetros de productividad | 57 |
| Tabla 10 | Tiempo efectivo en la unidad minera..... | 59 |
| Tabla 11 | Tiempos por los 9 volquetes parte 1 | 59 |
| Tabla 12 | Tiempos por los 9 volquetes parte 2 | 60 |
| Tabla 13 | Fórmulas de indicadores de acarreo..... | 66 |
| Tabla 14 | Datos tomados en Campo de indicadores de acarreo..... | 66 |
| Tabla 15 | Tiempo Promedio por ciclo (min)..... | 70 |
| Tabla 16 | Media y desviación estándar | 71 |
| Tabla 17 | Identificación de Valores Atípicos..... | 72 |
| Tabla 18 | Matriz de análisis de causas para volquetes con tiempos atípicos..... | 74 |
| Tabla 19 | Evaluación comparativa de herramientas de simulación | 76 |
| Tabla 20 | Calificación para selección de técnica de simulación..... | 77 |
| Tabla 21 | Parámetros para GPSS | 78 |
| Tabla 22 | Resultados en GPSS de 20 camiones..... | 78 |
| Tabla 23 | Costo total de Excavadora Volvo | 82 |
| Tabla 24 | Costo unitario de 1 volquete Mercedes Benz | 82 |
| Tabla 25 | Los valores reales observados del modelo de simulación | 87 |
| Tabla 26 | Resultados consolidados | 88 |
| Tabla 27 | Costos operativos directo | 88 |
| Tabla 28 | Promedio operativo | 90 |
| Tabla 29 | Indicadores operativos y económicos del sistema | 90 |
| Tabla 30 | Resultados del análisis de sensibilidad | 93 |
| Tabla 31 | Indicadores de desempeño (KPIs) logísticos | 95 |
| Tabla 32 | Responsables del control logístico..... | 97 |

Índice de Figuras

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Plan minero a cielo abierto..... | 8 |
| Figura 2 | Procedimiento de la metodología Sigma..... | 20 |
| Figura 3 | Interfaz de Ramp Mem..... | 31 |
| Figura 4 | Detector de fatiga o somnolencia..... | 32 |
| Figura 5 | Sistema Tooth Metric..... | 33 |
| Figura 6 | Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore..... | 34 |
| Figura 7 | Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore..... | 35 |
| Figura 8 | Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore..... | 35 |
| Figura 9 | Diagrama de Ishikawa..... | 44 |
| Figura 10 | Proceso DMAIC-SIX SIGMA..... | 50 |
| Figura 11 | Tiempos de carguío..... | 52 |
| Figura 12 | Promedio y desviación gráfica..... | 53 |
| Figura 13 | Ciclo de Carguío..... | 54 |
| Figura 14 | Tiempo cargando..... | 55 |
| Figura 15 | Tiempo acomodo..... | 55 |
| Figura 16 | Tiempo de espera..... | 56 |
| Figura 17 | Tiempo Operando Promedio por ciclo..... | 56 |
| Figura 18 | Tiempos del ciclo de Carguío..... | 57 |
| Figura 19 | Productividad Operativa, Efectiva e Instantánea..... | 58 |
| Figura 20 | Tiempo de Viaje Cargado 9 volquetes..... | 60 |
| Figura 21 | Tiempo de Cola de 9 volquetes..... | 61 |
| Figura 22 | Tiempo de Acomodo de 9 volquetes..... | 61 |
| Figura 23 | Tiempo Cuadrado de 9 volquetes..... | 62 |
| Figura 24 | Tiempo Cargando de 9 volquetes..... | 62 |
| Figura 25 | Tiempo de viaje cargado de 9 volquetes..... | 63 |
| Figura 26 | Tiempo de espera de descarga de 9 volquetes..... | 64 |
| Figura 27 | Tiempo retrocediendo de 9 volquetes..... | 64 |
| Figura 28 | Tiempo descargando de 9 volquetes..... | 65 |
| Figura 29 | Cola de acarreo (%)..... | 67 |
| Figura 30 | Tiempo de cola..... | 67 |
| Figura 31 | Productividad..... | 68 |
| Figura 32 | Velocidad Volquetes Vacíos..... | 68 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 33 | Velocidad Volquetes Cargados..... | 69 |
| Figura 34 | PayLoad | 69 |
| Figura 35 | Tiempos generales por ciclo de carguío..... | 71 |
| Figura 36 | Boxplot de tiempos promedio..... | 72 |
| Figura 37 | N° de camiones Vs. TM movidas en 10 Horas..... | 80 |
| Figura 38 | N° de camiones Vs. N° de Días | 81 |



Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes del Perú, aportando el 17.2% del PBI nacional (Bustamante y Molina, 2024). Dentro del ciclo de minado, el acarreo concentra alrededor del 37% de los costos operativos (Matos, 2020), por lo que su optimización resulta clave para mejorar la eficiencia y reducir gastos. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo optimizar la gestión de equipos en el sistema de acarreo para disminuir las demoras operativas y los tiempos muertos, empleando simulación de eventos discretos.

El estudio se estructura en seis capítulos.

El Capítulo I presenta el problema, los objetivos, la justificación y las delimitaciones.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, abordando antecedentes, conceptos del sistema de carguío–acarreo e indicadores operativos.

El Capítulo III expone la hipótesis y variables de estudio.

El Capítulo IV describe el método, la población, la muestra y los instrumentos de recolección de datos.

El Capítulo V muestra los resultados, el análisis DMAIC, la simulación en GPSS y la evaluación económica.

Finalmente, el Capítulo VI presenta la validación del modelo, el análisis de sensibilidad y el plan de control logístico.

Esta estructura permite comprender el comportamiento real del sistema de carguío y acarreo, identificar sus principales limitaciones y demostrar que la simulación constituye una herramienta eficaz para optimizar la operación minera y reducir sus costos asociados.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del Problema

Escobar (2017) afirma que una de las fases del ciclo minero es el acarreo. Aunque esta tarea parece ser simple, laboriosa y repetitiva, es crucial regular y confirmar el tiempo de esta actividad, ya que nos permitirá reducir los gastos operativos de la mina.

Córdova (2017) afirma que, aunque la minería está experimentando una serie de avances tecnológicos, el objetivo es reducir los gastos relacionados con estas operaciones, así como el tiempo de inactividad o tiempo no productivo.

Similar a Córdova, Castillo (2016) señala que existen muchos sistemas de control de transporte, incluyendo GPSS, Jigsaw y ControlSense. Dávila (2022) afirma que el transporte constituye el 50% o más de los gastos operativos totales en la minería. De esa cantidad, el 42% se atribuye a gastos de mantenimiento, el 39% a gasolina, el 10% a neumáticos y el 9% a mano de obra.

Aguilar (2020) afirma que el transporte, el acarreo y la carga son las actividades más significativas en la minería, lo que conlleva numerosos desafíos. Por lo tanto, la productividad puede evaluarse mediante Indicadores Clave de Desempeño (KPIs), centrándose en las actividades de carga y acarreo, particularmente en lo que respecta a los retrasos operativos y el transporte de materiales.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General.

¿Cómo se puede optimizar el sistema de carguío y acarreo para reducir las demoras operativas y optimizar los costos en una mina superficial del centro del Perú durante el año 2024?

1.2.2 Problemas Específicos.

¿Cuáles son las causas principales que generan la presencia de demoras operativas y tiempos muertos en las operaciones de carguío y acarreo durante 2024?

¿Qué acciones de mejora pueden plantearse para optimizar la gestión del ciclo de carguío–acarreo y disminuir la congestión, esperas y variabilidad del proceso durante 2024?

¿Cuál es el comportamiento de los costos operativos del sistema de carguío y acarreo durante 2024, y cómo podrían variar ante escenarios de mejora evaluados técnicamente?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General.

Optimizar el sistema de carguío y acarreo para reducir las demoras operativas y optimizar los costos en una mina superficial del centro del Perú durante el año 2024.

1.3.2 Objetivos Específicos.

Identificar y analizar las causas fundamentales de las demoras operativas y los tiempos muertos en las operaciones de carguío y acarreo, mediante el análisis de datos históricos y evaluación de procesos actuales.

Desarrollar y validar un modelo de análisis del sistema que represente el comportamiento operativo del carguío y acarreo durante 2024, permitiendo evaluar alternativas de mejora.

Evaluar el impacto de la optimización del sistema de carguío y acarreo en la reducción de demoras operativas y en el desempeño económico, utilizando indicadores de rendimiento y comparando los resultados con la línea base registrada en 2024.

1.4 Justificación e Importancia de la Investigación

1.4.1 Justificación.

La justificación para llevar a cabo dicha investigación es precisamente los problemas que representa los altos costos del acarreo dentro de las unidades mineras, por ello se busca la optimización de los mismos a través de un sistema de gestión de equipos mineros.

1.4.2 Importancia.

La importancia de esta investigación radica en los costos operativos que puede generar un mal control de los tiempos muertos de la unidad minera dentro del acarreo, además que esta representa más del 50% de los gastos de la minera

1.5 Limitaciones del Estudio

Poca información: Los datos se basan en registros de los tiempos muertos de varias unidades mineras del País e información de diferentes instituciones del estado peruano.

1.6 Delimitación de la Investigación

1.6.1 Delimitación Temporal.

La investigación se llevará a cabo en un período temporal específico, que abarcará el año 2024. Este marco temporal permitirá realizar un estudio detallado de los tiempos muertos ocasionados productos del acarreo.

1.6.2 Delimitación Espacial.

Esta investigación se llevará a cabo en una unidad minera operativa ubicada en el centro del Perú, la cual ha sido seleccionada como el contexto de estudio. Se centrará exclusivamente en esta unidad para garantizar una comprensión profunda de sus operaciones, desafíos y características específicas.

Capítulo II

Marco Teórico Conceptual

2.1 Antecedentes de la Investigación

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Suárez y Muñante (2023), en su tesis "Implementación de la Gestión de Equipos Mineros en la Pequeña y Mediana Minería para la Mejora de su Productividad," realizaron un análisis exhaustivo de los retrasos operativos e identificaron una deficiencia, ya que la disponibilidad y utilización mecánica varían en más del 40%. En consecuencia, el autor utilizó el diagrama de Pareto e identificó que los retrasos operativos provienen de la espera de trabajo, la espera de instrucciones de trabajo, las interrupciones durante los descansos, la ventilación inadecuada y la asignación de turnos. La implementación de un sistema adecuado y el registro de actividades facilitan la identificación de paradas principales, permitiendo la mejora de la productividad a través de un plan de acción.

Briones (2017) determinó en una tesis para el grado de Ingeniero de Minas titulada "Mejora del Sistema de Gestión de Pérdidas Operativas en la Mina Los Bronces" en Santiago, Chile, que las actividades responsables de más del cincuenta por ciento de las pérdidas de cobre fino están concentradas en los sectores de recursos humanos, trituración y carga. La presencia de ocurrencias adversas podría afectar las pérdidas; estos eventos ocurren durante los meses de invierno, incluyendo la congelación de las vías y roturas intempestivas, entre otros. Se debe establecer un proceso para facilitar la adquisición independiente de datos sobre pérdidas de minas y plantas. En consecuencia, se observó que estos retrasos operativos resultaron en una pérdida de 24.6 KTo de cobre fino durante los años 2016-2017. Este artículo aboga por la automatización de datos directamente desde Dispatch y SEP para mejorar la eficiencia.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

El Bachiller Matos (2020) en su tesis "Reducción de los Costos Unitarios de Carga y Transporte mediante la Programación de Equipos – Mina – Corihuarmi," afirma que el transporte constituye el 37% del ciclo minero total en esta unidad minera. La disminución en la ley de 0.8 gr/Tm a 0.23 gr/Tm es de suma importancia, lo que requiere la optimización del uso de recursos y los tiempos de transporte para reducir los costos unitarios. Este estudio permitió la optimización de los procesos y la actualización del equipo, resultando en una mejora del 23.5% en la producción. El costo de carga disminuyó de \$0.188 a \$0.175, resultando en una ganancia de \$471,810.18. Por el contrario, el descubrimiento de retrasos operativos facilitó el análisis del rendimiento del equipo, la disponibilidad mecánica y el uso, lo que resultó en una mejora de los resultados de producción.

Aguilar (2020) afirma en la tesis "Reducción de costos de acarreo y transporte de mineral mediante la aplicación de indicadores de desempeño KPI en la U.M. SUMAQ RUMI" que la unidad minera Sierra Poli SAC emplea el método de explotación de perforación larga, el cual ha experimentado costos crecientes debido a la gestión insuficiente de los KPI. Los hallazgos indicaron un aumento en las horas efectivas de 6.3 a 8 horas, una reducción en los retrasos operativos de 1.73 a 1.33 horas, y una disminución en los tiempos tolerados de 1.08 a 0.95 hr/Guardia. Las mejoras en el transporte resultaron en un aumento de productividad para el SC OOPS de 668 a 839 TM/día y para el otro SCOOP de 834 a 1082 TM/día. El costo unitario de un SCCOP se redujo notablemente de \$2.44/TM a \$1.99/TM, mientras que el costo del otro SCOOP cayó de \$1.96/TM a \$1.50/TM, representando una mejora del 18% al 23%.

Dávila (2022) afirma en la tesis "Optimización de los Costos de Transporte y Mineral mediante el Aumento de la Vida Útil de los Neumáticos en una Unidad de Minería a Cielo Abierto – 2021" que varios procesos mineros tienen como objetivo mejorar las actividades para optimizar los costos unitarios. La modificación sugerida fue la optimización del parámetro

TKPH y la asignación de rutas adecuadas para el transporte. Se logró una disminución del 10% en los gastos de neumáticos en el primer mes, seguida de una disminución del 8% en el segundo mes. Los hallazgos afectan el costo unitario de transporte, lo que a su vez impacta el costo total de minería de \$0.00624 por tonelada métrica.

Azareño y Guerrero (2019), en su tesis "Loading and Hauling in Mining Fleets: A Systematic Review," concluyen a través de un análisis bibliográfico que el proceso de acarreo constituye aproximadamente el 45% del costo total de la minería, y que el tiempo de inactividad impacta negativamente en la productividad. El uso de un sistema de control de flota facilita la gestión y erradicación de los retrasos operativos, disminuyendo así los gastos de transporte.

Flores y Roncal (2023), en su tesis "Optimización de los Costos Unitarios de Transporte y Carreo de Mineral con Equipos Mecanizados Rampa 440 NW Minera Aurífera Cuatro De Enero S. A.," realizaron un análisis del ciclo de carreo y evaluaron el rendimiento del equipo utilizado para el transporte de mineral en esta mina en Arequipa. Esto facilitó una disminución en los precios del mineral de \$2.45 por tonelada a \$2.15 por tonelada y en los gastos de sobrecarga de \$2.43 por tonelada a \$2.21 por tonelada. El Scooptram fue mejorado de 113 Tm/Hr a 120.54 Tm/Hr. Es esencial señalar que una mejor gestión de los ciclos puede facilitar el establecimiento de los tiempos ideales. Flores y Roncal, 2023

Salgado (2020) realizó un estudio de indicadores operativos, incluyendo la utilización y disponibilidad, en la tesis titulada "Mejoramiento de la productividad en el acarreo y transporte de mineral y desmonte en la veta Gavia – Nivel 100, Unidad Minera Huarón." Se utilizó la herramienta de Pareto para determinar los factores que influyen en el sistema de gestión de equipos de minería, resultando en una disminución del costo unitario de acarreo de \$2.2/Tm a \$1.99/Tm, con una utilización del 94% y una disponibilidad del 77%.

2.2 Bases Teóricas o Científicas

2.2.1 Minería a cielo abierto.

Se refiere a la minería a cielo abierto, un proceso industrial que tiene considerables impactos económicos, ambientales, sociales y culturales. (Chura, 2019).



Figura 1 Plan minero a cielo abierto. Adaptado de Hartman y Mutmansky (2002).

La imagen anterior ilustra que la primera fase de una operación minera a cielo abierto, o desmonte, implica la extracción de la capa superior del suelo y el suelo superficial que cubren el depósito. Es necesario considerar las reglas aplicables para ejecutar este procedimiento. (Chura, 2019)

Posteriormente, la extracción se lleva a cabo utilizando explosivos o tecnología para eliminar todo el estrato que oculta la estructura geológica que contiene el depósito. Los materiales están designados como estériles, y la formación planificada para la explotación se denomina mineral. Los proyectos mineros deben cumplir con las normas laborales, de seguridad y ambientales, especialmente en lo que respecta al impacto ambiental. Debido a la finalización previa de un Estudio de Impacto Ambiental, la mina está obligada a regular sus efluentes y llevar a cabo un monitoreo continuo de los niveles de agua, aire, suelo y ruido. (Chura, 2019)

Las operaciones de minería a cielo abierto son más lucrativas cuando los minerales están cerca de la superficie. La viabilidad económica de la minería a cielo abierto disminuye con el aumento de la profundidad del depósito, lo que hace necesario considerar alternativas de minería subterránea. Esto lleva a un aumento en los costos de explosivos, vehículos y otros recursos críticos. (Chura, 2019)

2.2.2 Etapas del minado.

Las etapas del minado, tanto en superficial y subterránea son:

2.2.2.1 Perforación.

La perforación en minería denota el procedimiento de crear aperturas en la roca para facilitar la colocación de explosivos para la detonación, la instalación de soportes de techo o la ejecución de otras tareas de excavación. Las máquinas de perforación difieren en dimensiones y capacidades, desde dispositivos manuales hasta taladros montados en plataformas y sistemas automatizados avanzados. El método de perforación utilizado depende del tipo de roca, las dimensiones necesarias del agujero y otros criterios como la ubicación y accesibilidad del sitio. (ENAMI, 2024).

2.2.2.2 Voladura o tronadura.

La voladura es un procedimiento regulado que utiliza explosivos para desintegrar formaciones rocosas sustanciales en fragmentos más pequeños y manejables para su manipulación y transporte. La eficacia de la voladura depende de muchos elementos, incluyendo la selección adecuada de explosivos, la disposición de la carga explosiva, la configuración de los patrones de perforación y la secuencia de detonación adecuada. La voladura es un procedimiento peligroso que requiere una gestión meticulosa y competente para proteger al personal y mitigar las repercusiones ambientales. (ENAMI, 2024).

2.2.2.3 Carguío.

Es el proceso mediante el cual se carga el mineral o desmonte extraído para su posterior transporte. Este procedimiento se realiza con excavadoras hidráulicas (de orugas o de llantas) cuyos tamaños varían según la capacidad requerida y las condiciones operativas de la mina (Gonzales & Martínez, 2017).

2.2.2.4 Acarreo.

El acarreo es la fase del proceso minero que implica transportar el material excavado desde la cara de trabajo hasta la superficie o hasta la planta de procesamiento. Esto puede incluir el uso de camiones volquetes, cintas transportadoras, trenes mineros u otros métodos de transporte, dependiendo de la distancia, el volumen de material y las condiciones topográficas. La eficiencia en el transporte es esencial para la rentabilidad de una operación minera, ya que constituye una fracción sustancial de los gastos operativos totales. Además, la logística del transporte debe estar meticulosamente organizada para garantizar un flujo de materiales ininterrumpido y prevenir cuellos de botella que puedan obstaculizar la producción. (Mendo, 2018).

2.2.3 Productividad óptima.

La máxima eficacia con la que se extrae y procesa el mineral en relación con los recursos utilizados se denomina productividad óptima en la minería. Esto implica la utilización eficiente de los recursos disponibles, incluyendo energía, materiales, mano de obra y equipos, con el fin de optimizar la producción de mineral de alta calidad dentro de un plazo determinado. La productividad óptima de las operaciones mineras requiere la implementación de tecnologías avanzadas, prácticas de gestión efectivas y una planificación meticulosa. El mantenimiento y aumento de la productividad a lo largo del tiempo dependen de la innovación y el desarrollo continuos, lo que puede resultar posteriormente en una mayor rentabilidad y competitividad en el mercado. (Aguilar, 2020).

2.2.4 Cálculo de la productividad de equipos de transporte.

La eficacia de estos dispositivos está influenciada por la capacidad del embudo y el número de viajes que puede hacer en una hora. La capacidad de la tolva depende de las características del material a transportar, como la densidad, el tamaño y la esponjosidad. El número de viajes que el vehículo puede hacer por hora depende del peso del vehículo, la capacidad del motor, la distancia de transporte y las condiciones de la carretera, incluyendo la pendiente y la resistencia a la rodadura. Agreda (2018).

Se pueden identificar tres medidas distintas para medir la productividad:

Productividad teórica: Denota el peso o volumen de producción por hora que una unidad puede producir sin interrupción mientras está en operación. Es una representación de la capacidad productiva máxima del equipo, que rara vez se realiza en la práctica.

Productividad promedio: La tasa de producción es la cantidad de peso o volumen que una unidad en operación produce por hora, teniendo en cuenta tanto los retrasos fijos como los variables. Esta tasa de producción debe determinarse para el período de tiempo previsto (día, turno) con el fin de estimar la producción total.

Productividad máxima: El peso o volumen producido por hora en una unidad en operación está representado por esta cantidad, que solo toma en cuenta los retrasos variables. Esta tasa de producción debe emplearse para determinar el número de unidades de transporte que deben asignarse a una pala para lograr la producción deseada. Agreda (2018).

Además, existen dos factores que juegan un rol importante en el índice de productividad de los equipos de transporte:

Tiempo de transporte: El ritmo de transporte está influenciado por el peso del equipo y el estado de la vía. Si no hay restricciones de seguridad o laborales, el ritmo dependerá del estado de la carretera, la pendiente y el peso del equipo y la carga. Para evitar que los frenos se degraden, los conductores deben reducir su velocidad.

El ritmo de estos vehículos está determinado por la inclinación de la carretera. La resistencia en la pendiente es la fuerza de tracción necesaria para superar la gravedad y permitir que un vehículo ascienda una pendiente positiva. Por cada 1% de inclinación, esta resistencia es equivalente al 1% del peso del vehículo. La resistencia a la rodadura de los neumáticos del vehículo debe considerarse además de la resistencia de la pendiente. La fuerza de tracción necesaria para superar la fricción entre los neumáticos y la carretera se conoce como resistencia a la rodadura.

Se consideran los siguientes parámetros: la pendiente, el estado de la carretera, la suma total de la resistencia de la pendiente más la resistencia por rodadura, la carga del vehículo, la carga transportada y la tabla de eficiencia del vehículo para diversas velocidades del motor. Agreda (2018).

Tiempo operativo: Significa el tiempo que el equipo tiene disponible para su operador y está preparado para completar la tarea. Se divide en:

Tabla 1

División de los factores del tiempo

| Tiempo Operativo | | |
|--|--|--|
| Tiempo efectivo | Tiempo de pérdidas operaciones | Tiempo de reserva |
| Se refiere al momento en que el equipo está completando sus tareas planificadas. | Se refiere al tiempo que el equipo pasa trabajando y realizando otras tareas, como desplazamientos y esperando a un equipo complementario. | Se refiere al período en el que el equipo preparado para trabajar no se utiliza, ya sea porque no hay personal disponible o porque su actividad no está programada en los planes de producción actuales. |

Nota: Adaptado de Agreda, 2018.

Determinación de la eficiencia de equipos móviles o auxiliares de diferentes tipos:

El tipo de equipo lo determina principalmente, pero en general se puede resolver calculando los siguientes elementos:

Tabla 2*Cálculo de productividad de equipos mixtos*

| Cálculo de productividad de equipos mixtos | | | | |
|---|--|--|---|---|
| Capacidad del equipo | Tiempo de ciclo | | | |
| | Tiempo de carga | Tiempo de transporte | Tiempo de descarga | Tiempo de retorno |
| Es la cantidad de carga que el equipo puede soportar en cada ciclo, que se determina por el tamaño del lampón del equipo empuje. Se determina utilizando la capacidad nominal del equipo. | Depende de las condiciones de trabajo. | Varía según la cantidad de carga, la potencia de la maquinaria empleada, la resistencia a la tracción, el tipo de terreno (inclinación) y la distancia a recorrer. | Involucra operaciones de maniobra y descarga. | Se diferencia en el tiempo de transporte cuando el equipo regresa vacío y con una pendiente opuesta a la etapa de transporte. |

Nota: Adaptado de Agreda, 2018.

Al trabajar en pendientes pronunciadas, la velocidad máxima de los equipos puede ser limitada para garantizar un frenado seguro. Como resultado, el tiempo de transporte debe ajustarse teniendo en cuenta esta restricción de velocidad máxima. (Agreda, 2018)

2.2.5 Costos en minería.

Los costos mineros abarcan los gastos asociados con cada fase del proceso minero, incluyendo la exploración y el desarrollo de un yacimiento, así como la extracción, refinación y transporte del mineral. Estos gastos pueden abarcar una diversa gama de componentes, incluyendo la adquisición de derechos mineros, la construcción de infraestructura minera, la compra y mantenimiento de equipos, los salarios del personal, los servicios públicos, los costos de energía, el tratamiento de residuos y la rehabilitación ambiental, entre otros. La viabilidad

económica de una operación minera depende de la gestión efectiva de los costos, ya que los márgenes de beneficio pueden ser limitados y los gastos imprevistos pueden tener un impacto sustancial en la rentabilidad.

2.2.5.1 Costos directos.

Los costos directos en la minería son aquellos que están directamente asociados con la producción de minerales y dependen de la cantidad de material extraído y procesado. Los salarios y beneficios del personal minero, los costos de mantenimiento y reparación de equipos, el suministro de materiales y reactivos químicos utilizados en el procesamiento de minerales, los costos energéticos asociados con la extracción y el procesamiento, así como otros gastos directamente relacionados con las actividades de producción, suelen estar incluidos en estos costos. Es esencial gestionar eficazmente los costos directos para optimizar la rentabilidad de una operación minera y controlar los gastos operativos. (Dávila, 2022).

2.2.5.2 Costos indirectos.

Los costos indirectos en la minería son gastos que no están explícitamente asociados con la producción específica de un mineral, pero son esenciales para que la operación continúe. Estos gastos pueden incluir una diversa gama de recursos y actividades que son indispensables para el funcionamiento general de la mina y no pueden atribuirse fácilmente a un producto o proceso en particular. Algunos ejemplos de costos indirectos en la minería incluyen:

- **Costos de Administración y Gestión:** Esto abarca la remuneración y los beneficios del personal administrativo y de gestión, así como los gastos asociados con las funciones administrativas, incluyendo contabilidad, recursos humanos, legal, compras y logística.
- **Costos de Infraestructura:** Estos gastos se refieren a las operaciones, mantenimiento y construcción de infraestructura en el sitio minero, incluyendo

estructuras, puentes, caminos, talleres, almacenes y sistemas de suministro de agua y energía.

- **Costos de Seguridad y Salud Ocupacional:** Incluyen los costos asociados con la implementación de medidas de seguridad y salud ocupacional para garantizar la protección de los trabajadores y cumplir con las regulaciones gubernamentales. Estas medidas incluyen equipos de protección personal, programas de capacitación en seguridad, inspecciones de seguridad y equipos de respuesta a emergencias.
- **Costos Ambientales:** Los siguientes son los gastos asociados con la mitigación y gestión de los impactos ambientales relacionados con las operaciones mineras. Estos gastos incluyen la monitorización ambiental, la remediación de sitios contaminados, la restauración de áreas afectadas y el cumplimiento de las regulaciones ambientales.
- **Costos de Comunicación y Relaciones Comunitarias:** Las iniciativas de responsabilidad social corporativa, incluidos los proyectos de desarrollo comunitario, los programas educativos y los proyectos de infraestructura local, así como los gastos asociados con la comunicación con las comunidades locales y otros interesados, están incluidos.
- **Costos Financieros:** Estos son los costos financieros asociados con la obtención de financiamiento para operaciones mineras, incluyendo los intereses de los préstamos, las comisiones bancarias y otros gastos relacionados. (Aguilar, 2020).

2.2.6 Indicadores de desempeño (KPIS) para el acarreo y transporte.

2.2.6.1 Tiempo de ida con carga.

Este indicador cuantifica la duración del tiempo necesario para que un vehículo volquete transporte una carga completa desde el punto de carga hasta el punto de descarga.

Tiempo de viaje de ida y vuelta con carga = Tiempo total de viaje – tiempo de carga.
(Aguilar, 2020).

2.2.6.2 Tiempo de retorno con vacío.

Esta métrica cuantifica la duración del tiempo requerido para que un vehículo volquete regrese desde el punto de descarga al punto de carga sin transportar ninguna carga.

La fórmula para el tiempo de regreso con carga vacía es la siguiente: Tiempo total de viaje - Tiempo de descarga (Aguilar, 2020).

2.2.6.3 Ciclo total del acarreo y transporte.

Este indicador mide el tiempo total necesario para completar un ciclo de acarreo y transporte, desde la carga del material en la fuente hasta su descarga en el destino, y el regreso del camión volquete al punto de carga.

Fórmula: Ciclo total del acarreo y transporte = Tiempo de ida con carga + Tiempo de retorno con vacío (Aguilar, 2020).

2.2.6.4 Cálculo del ciclo horario.

El ciclo horario representa el número de ciclos completos de acarreo y transporte que un camión volquete puede realizar en una hora.

Fórmula: Ciclos horarios = (60 minutos) / Ciclo total del acarreo y transporte. (Aguilar, 2020)

2.2.6.5 Rendimiento de Volquetes.

La eficacia de los vehículos de volquete se determina por la cantidad de material que cada camión transporta dentro de un marco de tiempo específico.

Fórmula: Eficiencia del Camión Volquete = Volumen Total de Material Transportado / Número Total de Viajes (Briones, 2017).

2.2.6.6 Disponibilidad Física.

La disponibilidad física es la duración de tiempo durante la cual una máquina o equipo está accesible para su operación designada, independientemente de si es planificada o

imprevista. Es crucial evaluar la capacidad de un equipo para cumplir con sus responsabilidades cuando sea necesario (Briones, 2017)

2.2.6.7 Disponibilidad mecánica.

La disponibilidad mecánica es la duración de tiempo durante la cual una máquina o equipo está disponible para su uso programado, excluyendo cualquier interrupción no prevista causada por fallos mecánicos. Esta métrica enfatiza la capacidad del equipo para operar sin interrupciones debido a fallos mecánicos. (Briones, 2017)

2.2.6.8 Disponibilidad operacional.

La disponibilidad operacional es el tiempo en el que un equipo o máquina está disponible para su uso programado, teniendo en cuenta tanto los tiempos de inactividad planificados como los no planificados. Este indicador proporciona una visión más completa de la disponibilidad del equipo, considerando todos los factores que pueden afectar su funcionamiento. (Briones, 2017)

2.2.6.9 Eficiencia.

La eficiencia es una métrica que cuantifica el grado en que el equipo o aparato se está utilizando en relación con su máxima capacidad. El tiempo de operación real se divide por el tiempo de operación programado, y el resultado se expresa como un porcentaje. La alta eficiencia sugiere que el equipo está siendo utilizado a su máximo potencial, mientras que la baja eficiencia puede indicar problemas con la planificación o ejecución de las operaciones

$$\text{Eficiencia} = (\text{Tiempo de operación real} / \text{Tiempo de operación programado}) \times 100\%$$

(Briones, 2017)

2.2.6.10 Utilización efectiva.

La utilización efectiva es una métrica que cuantifica el grado en que el equipo o aparato está siendo utilizado en relación con su tiempo total disponible. El tiempo de operación real se divide por el tiempo total disponible, y el resultado se expresa como un porcentaje. Este

indicador es beneficioso para evaluar hasta qué punto se están utilizando completamente los recursos disponibles.

$$\text{Utilizacion efectiva} = \text{Tiempo disponible total} / \text{Tiempo de operacion real} \times 100\%$$

(Matos, 2020)

2.2.6.11 Disponibilidad.

La disponibilidad se refiere a la capacidad de un mecanismo o equipo para ejecutar su función prevista cuando sea necesario. Dependiendo del contexto, puede indicar disponibilidad operativa, mecánica o física. Es una métrica crítica para garantizar que el equipo esté preparado y accesible para satisfacer los requisitos de producción. (Matos, 2020)

2.2.7 Elementos para el estudio de tiempos.

2.2.7.1 Tiempo productivo.

El tiempo productivo es la duración de tiempo durante la cual un trabajador o una máquina está activamente involucrado en una actividad que contribuye directamente al proceso de producción. Este tiempo está dedicado a la finalización de tareas críticas de producción, que pueden incluir operaciones de fabricación, ensamblaje y procesamiento, entre otras. (Matos, 2020)

2.2.7.2 Tolerancia.

La tolerancia en un estudio de tiempos es la cantidad de variación que se permite en los tiempos medidos como resultado de factores como la fatiga del trabajador, interrupciones imprevistas y ajustes de la máquina, entre otros. Es crucial establecer una tolerancia adecuada para tener en cuenta estas variaciones y obtener mediciones más precisas y realistas. (Matos, 2020)

2.2.7.3 Tiempo improductivo.

Todas las actividades que no contribuyen directamente al proceso de producción y que, por lo tanto, se consideran una pérdida de recursos, se incluyen en el tiempo improductivo. Esto

puede abarcar una variedad de factores, como los tiempos de espera, los retrasos, las interrupciones para mantenimiento o modificaciones, y los períodos de recuperación de errores. Es imperativo identificar y minimizar el tiempo improductivo para mejorar la eficiencia y la productividad de cualquier proceso. (Matos, 2020)

2.2.8 Tiempos de equipo y maquinaria.

Los tiempos que se emplean en el ciclo de acarreo son los siguientes:

- Tiempo de carga T_c
- Tiempo de descarga T_d
- Tiempo de maniobra T_m
- Tiempo de viaje con el balde lleno T_{vc}
- Tiempo de viaje con el balde vacío T_{vv}

2.2.8.1 Tiempo de ciclo.

El tiempo de ciclo en un estudio de tiempos es el tiempo total necesario para completar una unidad de producción, desde el inicio hasta la conclusión del proceso. Es una métrica crítica para evaluar la productividad y la eficacia de un proceso u operación. El tiempo de ciclo se puede determinar utilizando la siguiente fórmula:

$$\textit{Tiempo de ciclo} = \textit{Tiempo productivo} + \textit{Tiempo improductivo}$$

Tiempo productivo: es el tiempo durante el cual se realizan actividades que contribuyen directamente al proceso productivo.

Tiempo improductivo: es el tiempo durante el cual se realizan actividades que no contribuyen directamente al proceso productivo y se consideran desperdicio de recursos. (Matos, 2020)

2.2.9 Metodología Six Sigma.

Motorola fue la primera empresa en implementar esta metodología, que consta de cinco segmentos, para mejorar sus procesos, competitividad y productividad. El ingeniero Mikel

Harry desarrolló esta metodología. Definir, cuantificar, evaluar, mejorar y regular. (Navarro, et al, 2017)

2.2.10 Procedimiento de la metodología Sigma.

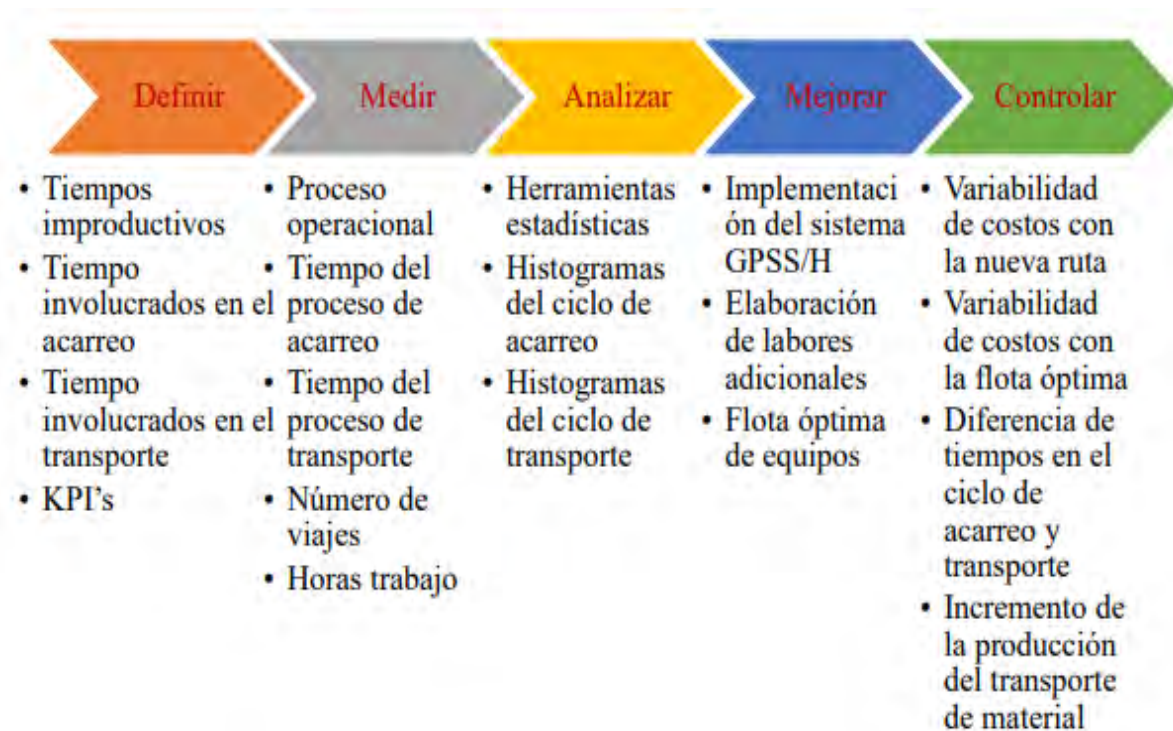


Figura 2 Procedimiento de la metodología Sigma

2.2.10.1 Definir.

El problema para abordar está explícitamente definido en esta etapa, y se establecen los objetivos del proyecto. Esto implica la identificación del proceso que requiere mejora, las expectativas y requisitos del cliente, la definición del alcance del proyecto y la formación de un equipo de trabajo. El objetivo es asegurar que todas las partes estén de acuerdo con los objetivos del proyecto y el problema actual. (Anchiraico y Rojas, 2020)

2.2.10.2 Medir.

Durante esta fase, se emplea el uso de instrumentos de medición adecuados para acumular datos pertinentes sobre el proceso en curso. El rendimiento del proceso se evalúa mediante el establecimiento de indicadores clave de rendimiento (KPI), y se evalúa la capacidad del proceso para satisfacer las especificaciones del cliente. El objetivo es determinar la funcionalidad del

proceso y cuantificar la gravedad del problema que se identificó en la fase anterior. (Anchiraico y Rojas, 2020)

2.2.10.3 Analizar.

Durante esta fase, se analiza la información recopilada para determinar las causas subyacentes de los problemas y las fuentes de variabilidad en el proceso. Los patrones, tendencias y relaciones entre variables se identifican mediante el uso de técnicas estadísticas y herramientas de análisis. El objetivo es identificar áreas críticas que requieren desarrollo y oportunidades para mitigar o erradicar la variabilidad en el proceso. (Anchiraico y Rojas, 2020).

2.2.10.4 Mejorar.

Durante esta fase, se idean y ejecutan soluciones para resolver los problemas subyacentes que se identificaron durante la fase de análisis. La solución óptima se elige para su implementación a gran escala después de realizar pruebas piloto y de investigar una variedad de soluciones potenciales. El objetivo es introducir modificaciones que mejoren sustancialmente el proceso y resulten en una mayor eficiencia y calidad. (Anchiraico y Rojas, 2020).

2.2.10.5 Controlar.

Los sistemas de control se utilizan en este punto para supervisar el rendimiento del proceso tras la implementación de las mejoras. Se establecen procedimientos y se definen medidas de control para prevenir la recurrencia de problemas y mantener los cambios. El objetivo es garantizar que el proceso continúe satisfaciendo de manera confiable las necesidades del cliente y que las mejoras implementadas sean sostenibles a largo plazo. (Anchiraico y Rojas, 2020).

2.2.11 Sistema Dispatch.

El sistema Dispatch generalmente implica los siguientes componentes y funciones:

2.2.11.1 Asignación de Tareas.

El sistema asigna tareas específicas a los trabajadores, equipos o vehículos disponibles en función de varios criterios, como la disponibilidad, la capacidad, la ubicación y la prioridad de la tarea.

2.2.11.2 Programación.

El sistema establece horarios y secuencias de trabajo para las tareas asignadas, teniendo en cuenta factores como los tiempos de viaje, los tiempos de procesamiento y las restricciones de capacidad.

2.2.11.3 Monitoreo y Seguimiento.

El sistema monitorea en tiempo real el progreso de las tareas en curso, proporcionando información sobre el estado actual de cada tarea y cualquier desviación o problema que surja.

2.2.11.4 Optimización de Rutas.

Para las operaciones de transporte o entrega, el sistema puede optimizar las rutas y programar los viajes de manera eficiente para minimizar los tiempos de viaje y los costos operativos.

2.2.11.5 Comunicación.

El sistema facilita la comunicación entre el personal de campo y el personal de despacho, permitiendo intercambiar información importante, instrucciones y actualizaciones sobre el progreso de las tareas.

2.2.11.6 Reportes y Análisis.

El sistema genera informes y análisis sobre el rendimiento operativo, incluyendo métricas como la puntualidad, la eficiencia de los recursos y el cumplimiento de los objetivos de servicio. (Anchiraico y Rojas, 2020)

2.2.12 Algoritmo del Sistema Dispatch.

Es importante tener en cuenta que este sistema maneja una gran cantidad de variables y datos para realizar asignaciones de manera eficiente y óptima. Los datos principales que deben manejar son:

Un marco de transporte que abarca todas las rutas viables: Un sistema de transporte multimodal que esté integrado. Este sistema podría abarcar una diversa gama de modalidades de transporte, incluyendo autobuses, trenes, tranvías, metros, bicicletas compartidas y servicios de transporte privado, todos los cuales están interconectados de manera fluida para permitir a los usuarios navegar por toda el área de servicio con facilidad y conveniencia. Además, esta estructura podría incorporar tecnología de información en tiempo real, rutas y horarios coordinados, y tarifas integradas para optimizar la comodidad y facilidad de uso para los usuarios. (Chura, 2019)

La inclinación y la distancia de cada excursión o viaje están denotadas por las inclinaciones y longitudes de cada ruta. Estos factores son esenciales para la planificación y evaluación de la dificultad y duración de una ruta, independientemente de si implica caminar, correr, andar en bicicleta, conducir o cualquier otro modo de transporte. La inclinación se cuantifica típicamente en porcentajes o grados, mientras que la longitud se cuantifica en kilómetros o millas. Los usuarios pueden seleccionar la ruta óptima considerando sus capacidades físicas, preferencias y objetivos, según lo indicado por estos datos. (Chura, 2019)

La duración de las actividades de carga y descarga en varios lugares es la siguiente: Es la duración del tiempo requerido para completar la carga o descarga de productos en una variedad de ubicaciones, incluyendo almacenes, terminales, centros de distribución y otros puntos de carga. Este concepto es esencial para la gestión de la logística y la cadena de suministro, ya que impacta en los tiempos de entrega, la eficiencia operativa y los costos. La duración de las actividades de carga y descarga puede variar dependiendo del tipo de mercancía, la

infraestructura disponible, la capacidad del equipo de carga, la planificación de la operación y la coordinación efectiva entre las partes involucradas. (Chura, 2019)

Condición de operación del aparato: El estado de la maquinaria, equipo o instrumentos que se emplean en un procedimiento particular. Esta condición puede evaluarse utilizando una variedad de indicadores, incluyendo la operatividad, la eficiencia, la sanidad, la seguridad y el mantenimiento realizado, entre otros factores críticos, para garantizar un funcionamiento adecuado. (Chura, 2019)

La productividad y la calidad de los procesos industriales dependen del estado de funcionamiento de los equipos, por lo que es esencial realizar un monitoreo constante y realizar los mantenimientos preventivos necesarios para evitar fallas o averías que puedan interrumpir la producción. Un buen funcionamiento de los equipos también contribuye a la seguridad de los trabajadores y al cumplimiento de las normas y estándares de calidad. (Chura, 2019).

Restricciones operativas, incluyendo la capacidad de los puntos de descarga y la prioridad de las cuchillas: Limitaciones u obstrucciones que pueden comprometer la eficacia y funcionalidad de un proceso o actividad. En el caso específico de las palas y la capacidad de los puntos de descarga, se refiere a la necesidad de establecer una orden de trabajo y garantizar que los puntos de descarga tengan la capacidad necesaria para acomodar el material transportado por las palas.

Es imperativo reconocer estas limitaciones operativas e implementar estrategias para mitigar sus efectos, ya que tienen el potencial de afectar la eficiencia operativa y la productividad. Esto puede implicar la optimización de los procesos de descarga, la asignación adecuada de recursos y la programación eficiente de tareas para garantizar un flujo continuo de material sin interrupciones. (Chura, 2019)

2.2.13 Sistema ControlSense.

Es un programa que fue creado por mineros y cuenta con una base de datos robusta, eficiente y asequible, así como una interfaz intuitiva. Está basado en las prácticas mineras más efectivas y un algoritmo de optimización de vanguardia. El tamaño de la cabina se reduce mediante el uso de la tecnología de hardware más sofisticada, incluyendo GPS y sensores electrónicos, que son meticulosamente seleccionados y posicionados en el equipo de transporte y carga. El software es simple, confiable y robusto, gracias a su enfoque en tiempo real de alta resolución y su base de datos adaptable. Es sencillo de integrar con otros sistemas comparables, tiene una alta capacidad de adaptabilidad y utiliza un sistema de programación ligero y robusto. (Agreda, 2018)

2.2.13.1 Sistema para supervisar y administrar flotas de vehículos.

Para cualquier organización que emplee aparatos y vehículos como componentes críticos de sus operaciones, la gestión de flotas es indispensable. En los últimos años, un número significativo de organizaciones ha implementado sistemas de gestión de flotas que utilizan tecnología GPS y software. Estos sistemas permiten a las organizaciones monitorear y regular la ubicación de sus vehículos y equipos, así como su eficacia, rendimiento y la seguridad de sus empleados y productos. (Agreda, 2018)

2.2.13.2 Komtrax Plus – Komatsu.

Komatsu desarrolló el sistema de monitoreo para maquinaria minera. Los datos de rendimiento de los componentes clave de la máquina se recopilan en tiempo real a través de una red integral de sensores y controladores. Estos datos se transmiten a través de la red satelital global las 24 horas del día, y cualquier dispositivo conectado a Internet puede acceder a un sitio web seguro y cifrado. (Agreda, 2018)

Incorporar nuevas mejoras, como la estandarización de antenas GPS en el equipo de minería, que anteriormente estaban disponibles exclusivamente para el equipo de construcción.

Además, es posible adquirir un paquete de actualización para mejorar un dispositivo que carece de antena GPS. El GPS tiene una amplia gama de aplicaciones en el equipo de minería, como la asignación de territorios, la visualización de la ubicación de flotas y equipos, y el seguimiento de rutas. (Agreda, 2018)

2.2.13.3 Operación del Komtrax Plus.

Equipment Care (EQP Care), una plataforma de gestión de equipos de Komatsu lanzada recientemente, tiene como objetivo mejorar la eficiencia del cliente. Esta herramienta integra los datos de Komtrax Plus en una interfaz fácil de usar pero poderosa que proporciona una vista completa de la flota en su conjunto y de cada equipo individualmente. (Agreda, 2018)

2.2.13.4 Vehículos autónomos.

Los camiones autónomos no son simplemente vehículos sin conductor; son sistemas automatizados complejos que colaboran para identificar obstáculos, detectar otros vehículos y responder rápidamente en caso de que un peatón cruce su camino. Una empresa propiedad de Komatsu, Modular Mining®, ha desarrollado tecnología computarizada que, cuando se combina con la avanzada tecnología de vehículos eléctricos de Komatsu, permite la monitorización, aceleración y desaceleración de rutas con una precisión inigualable. Esto disminuye la vida útil de los componentes, los neumáticos y el consumo de combustible. Estos vehículos se utilizan a diario en la mina Gabriela Mistral en Chile, lo que ilustra la magnitud de la capacitación que será necesaria para los futuros mineros. (Agreda, 2018)

2.2.13.5 Vigilancia a través de la tecnología GPRS-DCP.

En Perú, DCP, una corporación propiedad de KomatsuMitsui, utiliza un sistema desarrollado localmente y comunicación móvil GPRS para monitorear de forma remota los motores Cummins del equipo 730E, 830E y 930E. Al conectar el motor operativo en la mina con el servidor en las oficinas de Callao, este sistema permite el análisis en tiempo real de sus parámetros, la provisión de apoyo al personal en el sitio y la emisión de diagnósticos. Esta

tecnología se emplea actualmente en numerosas minas, como Antamina, Toquepala y Cuajone (Sur) y Lagunas Norte. (Barrick). (Agreda, 2018)

2.2.13.6 Jigsaw – Leica.

El recurso principal para monitorear, controlar, administrar y mejorar las actividades mineras es la plataforma Leica Jigsaw de segunda generación. Al integrar sin problemas los tres niveles fundamentales de las operaciones mineras—gestión y optimización de flotas, guía precisa y control autónomo—esta plataforma ofrece una solución integral para la gestión de minas. Agreda (2018)

En la industria, Leica Jigsaw se ha establecido como un referente debido a su adaptabilidad, utilidad, independencia y capacidad de expansión OEM. En la actualidad, esta plataforma facilita de manera efectiva las operaciones de más de 100 minas en 20 países de todo el mundo. Agreda (2018)

A los usuarios se les otorgan las capacidades esenciales para mantener una ventaja competitiva mediante la gestión efectiva de recursos y equipos con el innovador software de análisis e informes en tiempo real. Como resultado, es posible tomar decisiones bien informadas, mejorar la productividad y lograr un rendimiento excepcional para optimizar la producción minera. Agreda (2018)

Jmineops es una aplicación central que integra eficazmente todos los procesos de las actividades mineras de Leica, incluyendo la orientación de dragas y la administración de camiones, está en el núcleo del enigma. Jmineops ofrece una variedad de soluciones, incluyendo:

- **Jfleet:** Es una solución de gestión de flotas sofisticada y eficiente que permite la administración de los costos operativos y el aumento de la productividad. Jfleet utiliza algoritmos de optimización de vanguardia para proporcionar datos precisos e inmediatos sobre su ubicación y producción, optimizando así la eficiencia de sus

equipos y vehículos. Además, facilita las modificaciones a J2guidance y minimiza el retraso. (Agreda, 2018)

- **J2guidance:** Es la solución de orientación de alta precisión por GPS de Leica Jigsaw, está diseñada para dar a los tractores, excavadoras, palas y dragalinas una navegación precisa. Esta herramienta tiene todas las funciones de Jfleet, pero también tiene una orientación GPS precisa. (Agreda, 2018)
- **J3autonomous:** Esta solución de control remoto semi-autónoma de Leica Jigsaw es óptima para el equipo minero de la empresa. Leica Geosystems colabora con especialistas en robótica de todo el mundo para ofrecer una diversa selección de productos OEM independientes que facilitarán la automatización de las operaciones mineras. (Agreda, 2018)
- **Jtruck:** Permite el monitoreo del ciclo de transporte y la optimización de la eficiencia mientras se minimiza el retraso. Además, ofrece a los gerentes y operadores estadísticas de rendimiento en tiempo real, lo que reduce los costos de combustible y los tiempos de espera. Permite al operador monitorear la ubicación en tiempo real de todo el equipo de minería, determinar la ruta óptima y documentar incidentes como fugas y peligros. (Agreda, 2018)
- **Jshovel:** La importancia de mejorar la producción se subraya con los datos de carga en tiempo real de los vehículos cargados. Permite el monitoreo en tiempo real de la ubicación de todo el equipo de minería y el tiempo estimado de llegada de los camiones en la carretera. Además, presenta polígonos de bloques de material e indicadores clave de rendimiento en una pantalla en tiempo real. (Agreda, 2018)
- **Jdozer:** Enfatiza el entorno de trabajo íntimo de los vehículos con ruedas y orugas. Proporciona a los gerentes y empleados indicadores clave de rendimiento en tiempo real y registra con precisión todos los tiempos de trabajo, incluidos los retrasos y el

mantenimiento. Permite la gestión y supervisión de tareas y actividades al proporcionar visibilidad en tiempo real de las ubicaciones de todo el equipo minero. (Agreda, 2018)

- **Jdragline:** Es el monitor de dragalina más sofisticado del mundo, y ha transformado la industria al capturar automáticamente todos los datos del ciclo, proporcionando al operador acceso en tiempo real a indicadores de rendimiento críticos y ofreciendo información detallada sobre la carga útil de cada contenedor. Además, está equipado con numerosas alarmas integradas, como advertencias de desbordamiento y parada, comentarios sobre retrasos, pesos de los contenedores, tiempos de ciclo, número de oscilaciones y ubicaciones de perforación y eliminación. (Agreda, 2018)

2.2.13.7 Minestar – Caterpillar.

Ferreyros está actualmente involucrada en la operación de grandes proyectos mineros en Perú. Los cinco módulos tecnológicos de MineStar (Salud, Detección, Flota, Terreno y Comando) permiten la monitorización, administración y control de todo el equipo de movimiento de tierras contenido dentro de la mina. El objetivo principal es mejorar la seguridad, reducir costos y aumentar la eficacia del equipo para incrementar la productividad de la mina. Agreda (2018)

La gestión de flotas requiere la utilización de los módulos MineStar Fleet y Terrain. El módulo de Flota proporciona funciones estratégicas, incluyendo la gestión de máquinas en tiempo real, la asignación y la vigilancia, mientras opera con una diversa gama de equipos de movimiento de tierras. Agreda (2018)

Terrain facilita la programación y asignación de equipos en las operaciones mineras, lo que lleva a un aumento en la producción y una utilización eficiente del equipo, así como a la reducción de los tiempos de espera y una administración eficiente de los cambios de turno. Por el contrario, Fleet permite al personal de gestión monitorear la flota de vehículos de forma

remota y en tiempo real, lo que les permite acceder a datos críticos, incluyendo la carga transportada y el tiempo de ciclo. Además, mejora la gestión de los equipos auxiliares, facilita la integración de datos con otros sistemas electrónicos de gestión minera y facilita el monitoreo de la ubicación y el movimiento de los materiales. Agreda (2018)

La tecnología de guía en tiempo real permite la ejecución precisa de operaciones de perforación, nivelación y carga para equipos como excavadoras, cargadoras frontales y taladros en términos del módulo Terrain. Este sistema muestra la ubicación precisa de la máquina dentro de su área designada y el progreso de la producción de acuerdo con el plan a los operadores en su compartimento y al personal de gestión de la mina de forma remota. Además, Terrain indica zonas de riesgo preestablecidas y otros equipos en las cercanías para mejorar la seguridad. Agreda (2018)

En la actualidad, el módulo de Salud de MineStar es un instrumento estratégico crítico en la industria minera, ya que se dedica a la vigilancia de toda la flota de equipos. ofrece un sistema de diagnóstico y análisis sofisticado que permite la vigilancia remota y en tiempo real del equipo para detectar posibles problemas antes de que afecten su operatividad. Esto permite la implementación de medidas oportunas para prevenir interrupciones imprevistas e innecesarias, optimizar la eficiencia del mantenimiento mediante un enfoque predictivo y conservar tiempo y recursos. Además, se reduce el número de veces que el personal de mantenimiento puede acceder a la maquinaria, lo que mejora la seguridad y la gestión de recursos. Agreda (2018)

Además, estos componentes son capaces de operar de manera independiente y pueden personalizarse para satisfacer los requisitos y prioridades específicos de cada proyecto minero. (Agreda, 2018)

2.2.13.8 Plataforma de seguimiento Product Link.

Internet se puede utilizar para acceder a datos críticos, incluyendo el consumo de combustible, alertas para operaciones inapropiadas, identificación de eventos del equipo, horas de trabajo y ubicación geográfica, con el fin de obtener información estratégica sobre el equipo. Esta plataforma web te permite acceder a información y observar datos de una sola máquina o de toda la flota. Esto ayuda al cliente a mejorar la productividad y disponibilidad de sus dispositivos, detectar eventos de manera oportuna y planificar el mantenimiento necesario. (Agreda, 2018)

2.2.14 Sistema Ramp Mem.

Se trata de un sistema automatizado que monitorea continuamente los equipos de transporte y carga porque puede analizar los datos de camiones y palas en tiempo real (Chura, 2019). La interfaz de este sistema se muestra en la siguiente figura:

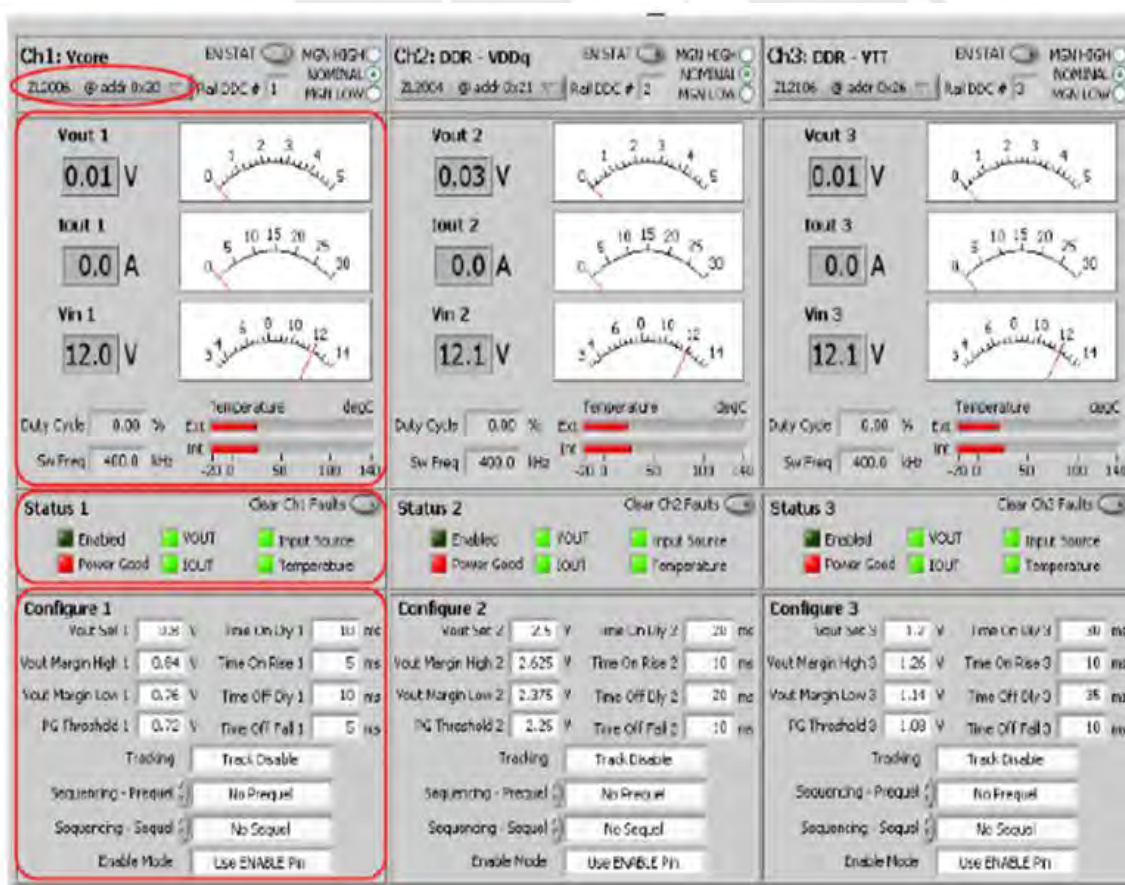


Figura 3 Interfaz de Ramp Mem. Tomado de Chura, 2019

2.2.15 Sistema DSS.

El Detector de Somnolencia es un sistema que utiliza un sensor en el panel del vehículo para informar al conductor sobre su nivel de alerta y fatiga. Esta tecnología ayuda a prevenir accidentes y mejorar la seguridad durante la conducción informando al conductor sobre su estado de atención. (Chura, 2019).



Figura 4 Detector de fatiga o somnolencia. Tomado de Chura, 2019.

2.2.16 Sistema Tooth Metrics.

Se trata de un sistema para encontrar dientes o uñas perdidas en las operaciones mineras con una pala o cargador frontal. Durante el uso de la pala, los dientes o las uñas pueden salir del cucharón, lo cual a menudo pasa desapercibido por el operador y puede afectar la productividad al disminuir el carguío. Además, la ausencia de un diente o uña puede causar daños en equipos aguas abajo, como chancadoras o cintas transportadoras, lo que puede tener consecuencias significativas en términos de tiempo y costos. Como resultado, corregir esta situación es crucial para evitar situaciones peligrosas en el futuro.



Figura 5 Sistema Tooth Metric. Tomado de Chura, 2019.

2.2.17 Norma Glencore.

Un conjunto de directrices internas que sirven como referencia se suma a otros estándares comparables, como el Estándar ASARCO, que establece regulaciones para las empresas asociadas con la compañía minera. (Chura, 2019)

Es bastante común en el sector minero implementar un sistema de control y evaluación de gestión para monitorear el estado operativo de los aparatos durante un período de tiempo predeterminado. El estándar de Glencore, que se utiliza ampliamente en la industria minera debido a su organización, fue empleado en este estudio. Esta norma emplea la distribución y descomposición de los tiempos para calcular una variedad de índices operativos. Esta norma, que regula tanto la operación como el sistema de transporte, establece un cronograma que se observa frecuentemente en la industria minera. Cada estado en el que se encuentra el aparato durante un período específico se describe y clasifica en la norma. (Chura, 2019)

| | | | | |
|------------|-------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| Nominal | | | | |
| Disponible | | | | No disponible Mantenición |
| Operativo | | | Reserva | |
| Efectivo | Demora Programada | Demora No Programada | Pérdidas Operacionales | |

Figura 6 Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore. Tomado de Chura, 2019.

Considerando la Figura 6, se definen las características de:

- El tiempo nominal es el tiempo total de un ciclo, que es el tiempo en el que el equipo está físicamente en la mina.
- El tiempo disponible se define como la cantidad de tiempo que el equipo está disponible para funcionar después de los tiempos de mantenimiento.
- El tiempo no disponible es el tiempo destinado a reparaciones o mantenimientos programados.
- El tiempo operativo es el transcurso en que el equipo permanece en operación en la mina con un operador presente.
- Tiempo de reserva es aquel en el que el equipo está operativo, pero no se usa, ya sea por falta de operador o por exceso de equipo.
- El tiempo efectivo es el tiempo que el equipo necesita para completar las tareas de producción sin interrupciones.
- Las demoras programadas son intervalos de espera programados.
- Paradas no programadas son aquellas que no se han programado y cuya duración no se sabe.
- Pérdidas operacionales es el tiempo que el equipo pasa sin hacer nada. La norma Glencore permite que cada empresa minera implemente su propio sistema de gestión del tiempo. (Chura, 2019)

2.2.18 Factores que afectan el rendimiento del equipo de carguío.

Algunos son:

- El equipo de transporte que consiste en conectar los dos equipos.
- El tamaño de las partículas del material aumenta la duración del transporte.
- Acción directa: aumenta el tiempo de transporte y el deterioro prematuro de los componentes.
- Habilidad del operador: se aplica a los operadores del equipo de transporte y del equipo de carga.
- Estado mecánico del equipo: el equipo de carga no debe tener fallas mecánicas significativas. (Alfaro, 2022)



Figura 7 Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore
Tomado de Alfaro, 2022.



Figura 8 Orden de tiempo de acuerdo con la regla de Glencore
Tomado de Alfaro, 2022.

2.2.19 Factores que afectan el proceso de carguío y acarreo.

2.2.19.1 Lluvias.

En la sierra, las lluvias son intensas de noviembre a abril, lo que causa una fuerte precipitación que afecta la estabilidad de las vías mineras. Cuando la lluvia cae en la mina, las vías se vuelven inestables y resbaladizas debido al material de las vías, especialmente en el tajo de gravas, donde hay una alta concentración de arcillas. Esto hace que los camiones se deslicen y se queden atrapados en el barro, lo que retrasa el rescate.

2.2.19.2 Visibilidad.

La falta de nivelación de las vías antes de la temporada de lluvias provoca charcos de agua en los caminos de transporte. Al usar material que no es adecuado para el lastrado, en lugar de crear una superficie compacta, se produce un parche temporal. Estos charcos representan un peligro para los neumáticos porque el conductor no puede ver lo que hay debajo de estos.

2.2.19.3 Tormentas.

Las tormentas eléctricas son extremadamente peligrosas y con frecuencia ocurren sin lluvia, especialmente durante los meses de octubre a abril, cuando es muy probable que ocurran. Las condiciones climáticas adversas son consideradas como resultado de estas tormentas, causadas por rayos de gran intensidad.

2.2.19.4 Neblina.

La neblina dificulta el avance adecuado del proceso de carga y transporte, lo que lleva a los camiones a una velocidad más lenta de lo normal e incluso a detener las operaciones por completo durante horas o turnos completos en caso de una visibilidad inferior a 40 metros. Si hay más de 40 metros de visibilidad, se reduce la velocidad y se mantiene una distancia de al menos 60 metros entre cada equipo.

2.2.19.5 Temperatura.

En días soleados, la temperatura puede oscilar entre los 28 °C y los 5 °C en la madrugada. Aunque todas las cabinas de los equipos tienen sistemas de aire acondicionado y calefacción, el operador no se concentra en su trabajo, lo que resulta en un bajo rendimiento. Las altas temperaturas hacen que el polvo se levante de las vías por las que circulan los camiones, lo que obliga a los camiones a ralentizarse durante los procedimientos de operación, lo que tiene un impacto negativo en la productividad.

2.3 Definición de términos básicos

KPIS

Los KPIs, o Indicadores Clave de Desempeño en español, son métricas utilizadas para evaluar el rendimiento y el éxito de una organización, un proyecto o un proceso. Estos indicadores se seleccionan porque están directamente relacionados con los objetivos estratégicos y proporcionan información significativa sobre el desempeño en áreas específicas. Los KPIs varían según la industria y el contexto, y se utilizan para monitorear y mejorar el rendimiento en diferentes aspectos, como ventas, calidad, productividad, satisfacción del cliente, entre otros. (Flores y Roncal, 2023)

Indicador

Un indicador es una medida o señal que proporciona información sobre una situación particular o el estado de un proceso. Los indicadores se utilizan para medir y evaluar el rendimiento, el progreso o el cumplimiento de objetivos. Pueden ser cuantitativos o cualitativos, y se utilizan para tomar decisiones informadas, identificar áreas de mejora y realizar un seguimiento del desempeño en diversas áreas de una organización o actividad. (Flores y Roncal, 2023).

Precio unitario

El precio unitario es el costo o valor de un solo artículo, producto o servicio. Se calcula dividiendo el precio total de un conjunto de artículos o servicios por la cantidad de unidades en ese conjunto. El precio unitario es útil para comparar costos entre diferentes proveedores o productos, calcular presupuestos y estimar el valor de una sola unidad de un artículo o servicio. (Flores y Roncal, 2023).

Productividad

La productividad se refiere a la relación entre la producción obtenida y los recursos utilizados para obtenerla. Es una medida de la eficiencia con la que se utilizan los recursos para producir bienes o servicios. La productividad puede medirse en términos de la producción por unidad de tiempo, la producción por empleado, la producción por máquina, entre otros. Un aumento en la productividad indica que se está produciendo más con los mismos recursos o la misma cantidad con menos recursos, lo que se considera deseable en la mayoría de los contextos económicos y empresariales. (Flores y Roncal, 2023).

Capítulo III

Hipótesis y Variables

3.1 Hipótesis General

La optimización del sistema de carguío y acarreo, apoyada en el enfoque DMAIC y en la simulación de eventos discretos, permitirá reducir las demoras operativas y mejorar el desempeño de costos de la operación.

3.2 Hipótesis Específicas

El enfoque DMAIC permitirá identificar con precisión las principales fuentes de demoras operativas y tiempos muertos del sistema de carguío y acarreo.

La simulación de eventos discretos permitirá evaluar escenarios operativos capaces de disminuir colas, esperas y variabilidad del ciclo.

La comparación entre la línea base y los escenarios evaluados permitirá determinar el impacto de la optimización en la reducción de demoras y en los costos del proceso.

3.3 Variables de Estudio

3.3.1 Variable Independiente.

Optimización del sistema de carguío y acarreo mediante gestión de equipos.

3.3.2 Variable Dependiente.

Demoras operativas y costos de carguío y acarreo.

Tabla 3

Operacionalización de variables

| Variables | Indicador |
|--|--|
| Variable independiente | -Número de camiones y tiempos no productivos -Indicadores del sistema de Carguío y Acarreo |
| Optimización del sistema de carguío y acarreo mediante gestión de equipos. | -Gráficos estadísticos del ciclo de carguío y acarreo - Modelamiento y simulación del sistema en GPSS -Comparación de costos y validación del modelo |
| Variable dependiente | -Cantidad de horas trabajadas por día -Payload promedio de camiones |
| Demoras operativas y costos de carguío y acarreo. | -Tiempo de carguío, descarga óptimo y total del ciclo -Costo total operativo y cumplimiento del plan |

Capítulo IV

Método de la Investigación

4.1 Tipo y Nivel de la Investigación

4.1.1 Tipo de la Investigación.

Este estudio se define como explicativo–proyectivo, porque no solo caracteriza la situación actual del sistema de carguío y acarreo, sino que profundiza en las causas que originan las demoras operativas y, a partir de ello, plantea una propuesta técnica de mejora sustentada en simulación y en el análisis de datos reales (Hernández & Mendoza, 2018).

El componente explicativo se articula a través del enfoque DMAIC del método Six Sigma, que ofrece una ruta sistemática para identificar las relaciones causales entre las variables críticas del proceso. En las etapas de análisis y mejora se constató que la congestión en las rutas de acarreo y el tamaño insuficiente de la flota de volquetes constituyen los factores que más contribuyen a los retrasos y al incremento de los costos unitarios. Con base en esta evidencia, el estudio demuestra cómo la variabilidad operativa repercute directamente en la productividad y en el desempeño económico del sistema de transporte.

Asimismo, el carácter explicativo se refuerza porque el análisis busca comprobar de qué manera las variables independientes, como los tiempos muertos, la congestión del acarreo y la disponibilidad de equipos, inciden en la variable dependiente, representada por el costo operativo total. La aplicación del ciclo DMAIC permite delimitar las causas raíz y evaluar, mediante simulación, cómo la modificación de los factores críticos incide en la reducción de demoras y costos.

El componente proyectivo se materializa en la formulación de una propuesta de gestión optimizada, basada en la simulación del sistema bajo distintos escenarios de flota y condiciones operativas. Los resultados muestran que la gestión ineficiente del número de volquetes está asociada a pérdidas económicas por inactividad, mientras que la validación del modelo con

datos reales confirma que la congestión de flota es el principal generador de demoras. De esta manera, se evidencia que la utilización de un enfoque proyectivo apoyado en simulación permite incrementar la productividad y optimizar el costo por tonelada transportada, justificando plenamente la elección del diseño explicativo–proyectivo.

4.1.2 Nivel de Investigación.

Este nivel se sustenta en la metodología Six Sigma (DMAIC), que permite pasar de la descripción del problema (identificación de causas) a la explicación del comportamiento de las variables críticas y a la proyección de una solución práctica. En tal sentido, la investigación no se limita a analizar datos históricos, sino que explica las causas que originan las ineficiencias y propone una mejora validada a través de simulaciones en el software GPSS.

El carácter aplicado se manifiesta en el uso de herramientas tecnológicas (GPSS, análisis estadístico, indicadores de desempeño) orientadas a resolver un problema real de la operación minera.

El componente explicativo radica en que se demuestra que la congestión del sistema de acarreo y el número inadecuado de volquetes son las causas principales de los tiempos muertos y, por tanto, de los sobrecostos operativos.

Por tanto, el estudio integra el análisis de causalidad y la aplicación de una solución técnica proyectiva, lo que confirma su nivel aplicado-explicativo, orientado a la mejora continua de los procesos mineros.

4.2 Población y Muestra de la Investigación

4.2.1 Población.

La población en este contexto de investigación está constituida por todos los volquetes de la unidad minera superficial, y la variable de interés corresponde a las demoras operativas de dichos equipos.

4.2.2 Muestra.

La muestra del estudio estuvo conformada por los nueve volquetes operativos que integran la flota total de la empresa Tajo S.R., dedicada a operaciones mineras a cielo abierto en la zona central del Perú. La inclusión de estos nueve equipos responde a que constituyen la totalidad de la población disponible, por lo que su selección no obedeció a criterios de aleatoriedad, sino a un muestreo censal de carácter no probabilístico, donde se estudian todos los elementos relevantes del sistema operativo. Según Hernández y Mendoza (2018), en investigaciones aplicadas es pertinente recurrir a muestras equivalentes a la población cuando el número de unidades es reducido y el objetivo es obtener una representación exacta del fenómeno, lo cual se ajusta plenamente a este caso.

El uso de la totalidad de la flota también se sustenta en criterios técnicos; los nueve volquetes participan simultáneamente en el mismo ciclo de carguío–acarreo, operan bajo condiciones homogéneas (distancia recorrida, pendiente, tipo de material, turnos y nivel de capacitación del operador) y son supervisados por un único sistema de monitoreo y control de flota. Esta homogeneidad y disponibilidad completa permite trabajar con un sistema cerrado, condición que; lo cual favorece la validez interna del análisis cuando se evalúan procesos continuos con interacción entre recursos.

Dado que la empresa no cuenta con más unidades, la totalidad de la flota constituye la muestra y la población al mismo tiempo, lo que asegura que los resultados describan con precisión el comportamiento real del sistema de transporte. La elección de esta muestra permite capturar íntegramente la dinámica del tráfico interno, los tiempos de espera, los cuellos de botella y las variaciones productivas del conjunto de equipos, elementos indispensables para construir un modelo de simulación robusto.

En consecuencia, la muestra de nueve volquetes es metodológicamente adecuada y técnicamente necesaria para representar de manera fiel el ciclo operativo completo; esta aproximación garantiza que el modelo desarrollado en GPSS reproduzca las condiciones reales del sistema y permita evaluar escenarios de optimización con alto nivel de confiabilidad.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.3.1 Técnicas.

Revisión de documentaria: Llevar a cabo una revisión exhaustiva de los informes de incidentes y accidentes previos, así como de otros documentos relacionados con la seguridad laboral en la unidad minera.

Observación directa: Recolección de datos en campo en la unidad minera superficial en el Tajo S.R.

4.3.2 Instrumentos.

Se utilizará fichas de recolección de datos con referente a las demoras operativas de la unidad minera, además se tendrá en cuenta los costos que simbolizan en el acarreo.

Capítulo V Resultados

5.1 Causas fundamentales que ocasionan las demoras operativas y tiempos muertos.

En la figura 9 se presenta el diagrama de Ishikawa, en el que se analizan las causas que generan demoras y tiempos muertos en el acarreo.

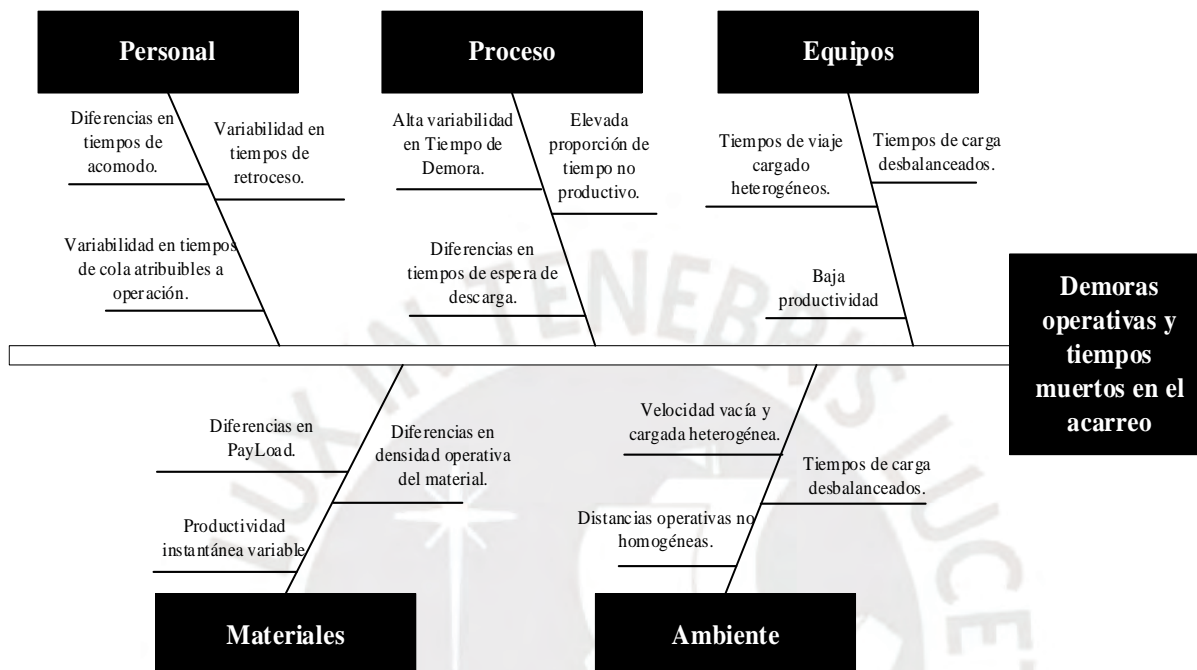


Figura 9 Diagrama de Ishikawa

A continuación, se describe cada causa identificada, la cual se sustenta en información cuantitativa recopilada en la empresa:

1. PERSONAL

Causa 1: Diferencias en los tiempos de acomodo: Se observó que los operadores registraron tiempos de acomodo que oscilaron entre 0.46 y 1.00 minutos, evidenciando una variación de hasta 0.54 minutos. Esta diferencia, aunque aparentemente menor, reflejó contrastes en la precisión y fluidez de las maniobras iniciales. Cuando estas maniobras eran más lentas o requerían correcciones adicionales, se generaban pequeñas colas que, acumuladas durante la jornada, contribuían a la congestión tanto en los puntos de carguío como de descargue.

Causa 2: Variabilidad en los tiempos de retroceso: Los tiempos de retroceso fluctuaron entre 0.3 y 0.9 minutos, con una diferencia máxima de 0.6 minutos entre operadores; esta dispersión indicó habilidades heterogéneas en la aproximación al punto de descarga. Cuando el retroceso requería más tiempo, el camión retrasaba la liberación del espacio operativa, afectando el orden y ritmo del flujo vehicular.

Causa 3: Variaciones en los tiempos de cola atribuibles al operador: Los periodos de espera en cola asociados directamente al desempeño del operador se ubicaron entre 4.2 y 7.9 minutos, lo que representó una diferencia de 3.7 minutos; este margen mostró que la gestión del flujo, la alineación correcta y la rapidez para responder a las condiciones del entorno dependían de la pericia del operador; es así que una menor capacidad de reacción aumentaba la permanencia en cola y contribuía a la formación de cuellos de botella.

2. PROCESO

Causa 1: Alta variabilidad en el Tiempo de Demora (TD): El Tiempo de Demora presentó una amplitud de 0.3 a 1.3 minutos, con una desviación estándar de 0.40 minutos; esta variabilidad se convirtió en el principal factor que afectó la estabilidad del tiempo total del ciclo, el cual fluctuó entre 3.8 y 5.7 minutos. Cada incremento en el TD alteraba la sincronización de los camiones, ampliando el riesgo de acumulaciones sucesivas.

Causa 2: Elevada proporción de tiempo no productivo: El análisis evidenció que el 68.29% del tiempo efectivo se destinaba a actividades no productivas, especialmente demoras y esperas; esta proporción, que superaba con holgura más de dos tercios del tiempo operativo, se tradujo en una capacidad reducida para sostener un flujo continuo. En consecuencia, surgieron cuellos de botella recurrentes que impedían aprovechar plenamente la disponibilidad de equipos.

Causa 3: Diferencias marcadas en los tiempos de espera de descarga: Los tiempos de espera en el punto de descarga oscilaron entre 0.8 y 2.9 minutos, lo que representó una variación

de 2.1 minutos; esta diferencia indicaba que los camiones no llegaban de manera uniforme al lugar de descarga, generando momentos de saturación que ralentizaban la rotación de vehículos y propiciaban episodios de congestión.

3. EQUIPOS

Causa 1: Heterogeneidad en los tiempos de viaje cargado: Los tiempos de viaje cargado mostraron un amplio rango, desde 51.1 hasta 78.4 minutos, con una diferencia de 27.3 minutos entre el vehículo más eficiente y el más lento; esta dispersión se relacionó con diferencias en rendimiento, estado mecánico o forma de operación; es así que cuando un equipo tardaba más en completar el tramo cargado, provocaba desalineaciones en la llegada de camiones a los puntos de descarga, lo que incrementaba la congestión en ruta.

Causa 2: Tiempos de carga desbalanceados: Se identificó que el tiempo de carga variaba entre 1.22 y 3.02 minutos; el equipo AWG-822 requería hasta 1.8 minutos más que el más eficiente (BHI-841) para completar la misma tarea. Este desbalance dificultaba la sincronización entre cargador y camiones, generando colas cuando los vehículos debían esperar su turno para ser atendidos.

Causa 3: Disparidad en la productividad (Ton/hr): La productividad de los equipos fluctuó entre 14.03 y 18.77 toneladas por hora, con una diferencia de 4.74 toneladas por hora; esta inconsistencia redujo la uniformidad del ciclo operativo, pues los equipos menos productivos retardaban la progresión general, generando acumulación en puntos críticos y prolongando los tiempos de espera.

4. MATERIALES

Causa 1: Variaciones en el Payload por viaje: Los camiones transportaron cargas que oscilaron entre 37 y 40 toneladas, evidenciando una variación de 3 toneladas; aquellos vehículos que movilizaban cargas mayores requerían más tiempo para ganar velocidad y frenar,

especialmente en tramos con pendientes o curvas; esta condición afectó las velocidades promedio y generó diferencias apreciables en los tiempos de desplazamiento.

Causa 2: Productividad instantánea inferior a la operativa: Se registró una productividad instantánea de 12.605 m³/h, mientras que la efectiva se redujo a 8.907 m³/h, equivalente a una disminución del 29.34%; este descenso se explicó por interrupciones constantes que impedían mantener el ritmo óptimo; la pérdida de continuidad prolongó el ciclo y redujo la capacidad para estabilizar la circulación.

Causa 3: Variaciones en la densidad operativa del material: La densidad operativa mostró una caída del 33.4%, pasando de 22.689 a 15.106 toneladas por hora en condiciones reales; esta reducción generó ciclos más prolongados, ya que el material variaba en su compactación o fluidez durante la carga. Como consecuencia, se incrementó el tiempo total necesario para completar cada desplazamiento y se produjo mayor congestión.

5. AMBIENTES

Causa 1: Diferencias en velocidades vacías y cargadas: Los camiones circulaban vacíos a velocidades de 4.75 a 5.98 km/h, mientras que en condición cargada lo hacían entre 1.94 y 2.98 km/h. La diferencia de 1.04 km/h en condición cargada fue suficiente para generar desincronizaciones entre los vehículos; incluso variaciones pequeñas producían retrasos acumulativos que afectaban la fluidez del tránsito interno.

Causa 2: Distancias operativas no homogéneas: Los tiempos de viaje vacío fluctuaron entre 25.5 y 32.1 minutos, lo que representó una diferencia de 6.6 minutos; esta variabilidad reflejó diferencias en rutas, pendientes o condiciones del camino. Cuando algunos equipos tardaban más en retornar al punto de carga, se desordenaba la secuencia de llegada, ocasionando colas y tiempos muertos.

Causa 3: Condiciones del terreno que afectan los tiempos cuadrados: Los tiempos asociados a la estabilización del camión antes del carguío variaron entre 0.9 y 1.9 minutos,

evidenciando una diferencia de 1 minuto; superficies irregulares, zonas con mayor vibración o falta de nivelación obligaban al operador a invertir más tiempo en posicionar el vehículo. Esto ralentizaba el inicio de la carga y ampliaba las demoras a lo largo del ciclo.

En la tabla 4 se resumen el análisis de Ishikawa:

Tabla 4

Causas y análisis en base a la unidad minera superficial

| Categoría | Causa | Información recopilada | Descripción del efecto operacional |
|------------------|---|---|---|
| 1. PERSONAL | – Diferencias en tiempos de acomodo | 0.46 – 1.00 min (variación 0.54 min) | – Maniobras menos eficientes generan colas y congestión en carguío y descargue. |
| | – Variabilidad en tiempos de retroceso | 0.3 – 0.9 min (diferencia 0.6 min) | – Habilidades dispares en la aproximación incrementan el tiempo para posicionarse. |
| | – Variabilidad en tiempos de cola atribuibles a operación | 4.2 – 7.9 min (diferencia 3.7 min) | – La pericia del operador influye en la gestión del flujo y la alineación de equipos. |
| 2. PROCESO | – Alta variabilidad en Tiempo de Demora (TD) | 0.3 – 1.3 min ($\sigma = 0.40$) | – Principal causa de fluctuaciones del tiempo total del ciclo (3.8–5.7 min). |
| | – Alta proporción de tiempo no productivo | 68.29% del tiempo efectivo | – Las demoras absorben más de dos tercios del tiempo operativo, generando cuellos de botella. |
| | – Variabilidad en tiempos de espera de descarga | 0.8 – 2.9 min (variación 2.1 min) | – Incrementa la congestión en zonas de descarga por llegadas desincronizadas. |
| 3. EQUIPOS | – Tiempos de viaje cargado heterogéneos | 51.1 – 78.4 min (diferencia 27.3 min) | – Diferencias en eficiencia o distancia incrementan la congestión en rutas internas. |
| | – Tiempos de carga desbalanceados | 1.22 – 3.02 min (diferencia 1.8 min entre equipos) | – La desincronización entre cargador y camiones genera colas de espera. |
| | – Productividad dispersa (Ton/hr) | 14.03 – 18.77 Ton/hr (diferencia 4.74) | – La falta de uniformidad amplía los ciclos y genera acumulación en puntos críticos. |
| 4. MATERIALES | – Diferencias en PayLoad | 37 – 40 ton (variación 3 ton) | – Mayor carga exige más tiempo de aceleración y frenado, afectando velocidades promedio. |
| | – Productividad instantánea vs efectiva | 12.605 m ³ /h → 8.907 m ³ /h (–29.34%) | – Interrupciones reducen la productividad real y prolongan los ciclos. |
| | – Variaciones en densidad operativa | 22.689 → 15.106 Ton/hr (–33.4%) | – Diferencias en compactación o fluidez del material extienden el ciclo y generan congestión. |
| 5. AMBIENTES | – Diferencias en velocidades vacías y cargadas | Vacío: 4.75–5.98 km/h; Cargado: 1.94–2.98 km/h (variación 1.04 km/h cargado) | – Desincroniza la flota y retrasa la llegada secuencial de camiones. |
| | – Distancias operativas no homogéneas | Viaje vacío: 25.5 – 32.1 min (diferencia 6.6 min) | – Llegadas desfasadas al punto de carga generan colas y tiempos muertos. |
| | – Condiciones del terreno que afectan tiempos cuadrados | 0.9 – 1.9 min (variación 1 min) | – Superficies irregulares aumentan el tiempo de estabilización previo al carguío. |

Sustento estadístico:

A partir de los datos cuantitativos sintetizados en la tabla 4 se tiene lo siguiente:

(a) Alta variabilidad + ciclo corto = congestión acelerada: El tiempo total del ciclo (3.8–5.7 min) es corto en comparación con la variabilidad en cada una de sus partes:

–Operador puede añadir 3.7 min en cola

–Espera de descarga añade 2.1 min

–TD añade 1.0 min

–Estabilización añade 1.0 min

Cuando la variabilidad acumulada supera el 60–100% del ciclo, el sistema no puede procesar múltiples camiones sin formación de colas.

(b) La flota opera con ciclos inconsistentes (27.3 min de diferencia en viaje cargado):

Con tiempos tan dispares, los camiones no llegan en intervalos regulares. Por tanto, el número actual de unidades generan una restricción para el logro del acarreo.

5.2 Modelo six sigma en base al modelo DMAIC

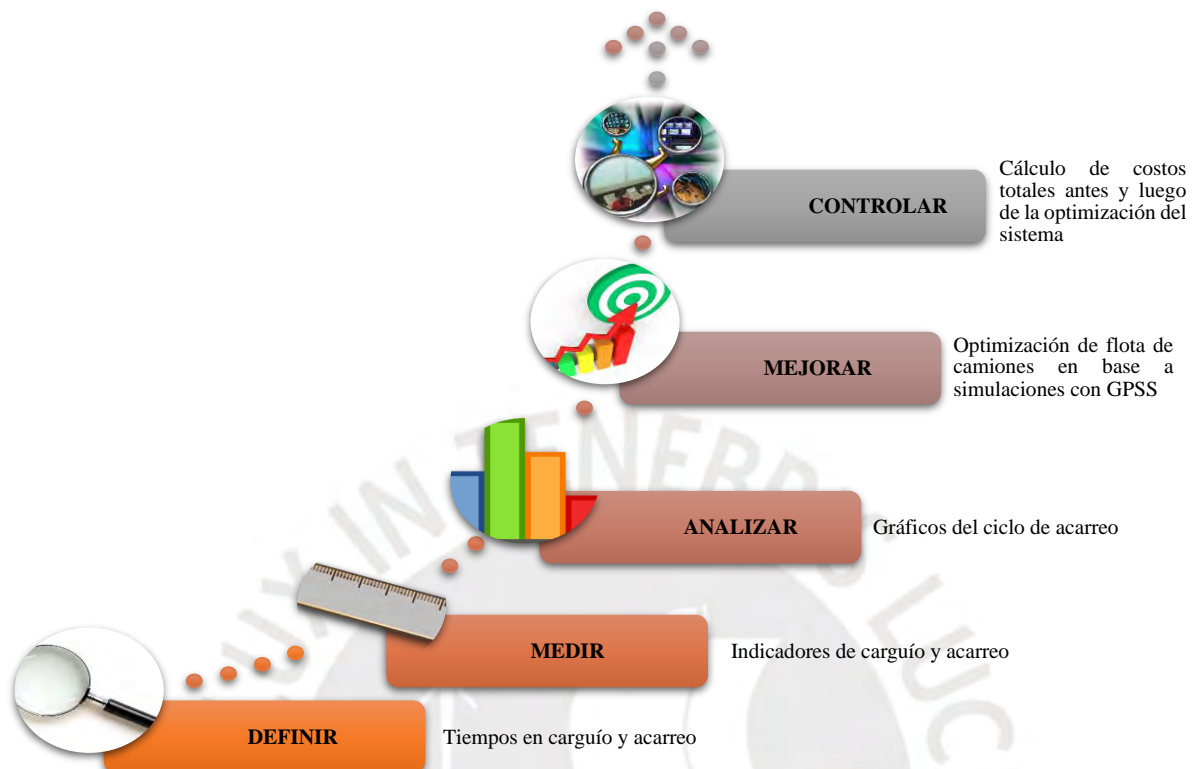


Figura 10 Proceso DMAIC-SIX SIGMA

El enfoque basado en datos y la estructura metódica de la metodología Six Sigma, específicamente el proceso DMAIC, son las razones por las cuales este estudio ha optado por emplearla para abordar los retrasos y las interrupciones operativas en las operaciones de carga y transporte. El proceso DMAIC y Six Sigma permiten la identificación de problemas precisos, la acumulación de datos detallados sobre la productividad y los costos actuales, y la implementación de soluciones basadas en un análisis riguroso de las causas raíz. Adaptándose a las características únicas de Tajo S.R., este método garantiza un desarrollo continuo y sostenible al erradicar ineficiencias, optimizar los costos operativos y aumentar la productividad. La metodología garantiza que las soluciones sean pertinentes y efectivas, estableciendo así una base sólida para la rentabilidad y eficiencia de la operación minera. También proporciona un marco sólido para reducir retrasos y optimizar costos.

5.2.1 Definir.

En esta fase preliminar, se procederá a la recopilación de datos para la identificación y análisis de tiempos operativos. La muestra considerada incluye un total de 19 volquetes. Se emplearon los estándares temporales establecidos según las políticas internas de la organización, permitiendo así la recolección sistemática de datos en los diferentes frentes de trabajo.

Tabla 5

Esquema de tiempos Unidad minera superficial

| Tiempo global | | | | |
|--|----------|------------|---------------|--|
| Tiempo de trabajo activo/Tiempo Disponible Operando/Efectivo | | | Mantenimiento | |
| Demora | Inactivo | Programado | Correctivo | |

Nota: Es estudio se centra en el presente esquema de tiempos

5.2.1.1 Análisis de los tiempos en Tajo S.R.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos promedio de cinco volquetes ubicados estratégicamente en el Tajo S.R., cabe recalcar que El carguío se efectuó utilizando la Excavadora 336DL de Caterpillar.

Tabla 6

Tiempos de carguío de 5 volquetes

| V(Modelo) | TO (Min) | TD (Min) | TSB(Min) | TM(Min) | TT(Min) |
|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| AVA-838 | 4.1 | 0.5 | 0.1 | 0 | 4.7 |
| BAN-877 | 3.8 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 4.6 |
| FOF-895 | 3.9 | 1.3 | 0.1 | 0.4 | 5.7 |
| FOF-895 | 3.7 | 0.5 | 0 | 0.1 | 4.3 |
| FOF-949 | 3.3 | 0.3 | 0.2 | 0 | 3.8 |

Nota: Las siglas hacen correspondencia a lo siguiente: V(Modelo) es el modelo del volquete, (TO) Tiempo Operando, (TD) tiempo de Demora, (TI) tiempo de Stand by, (TM) Tiempo de mantenimiento, (TT)Tiempo total.

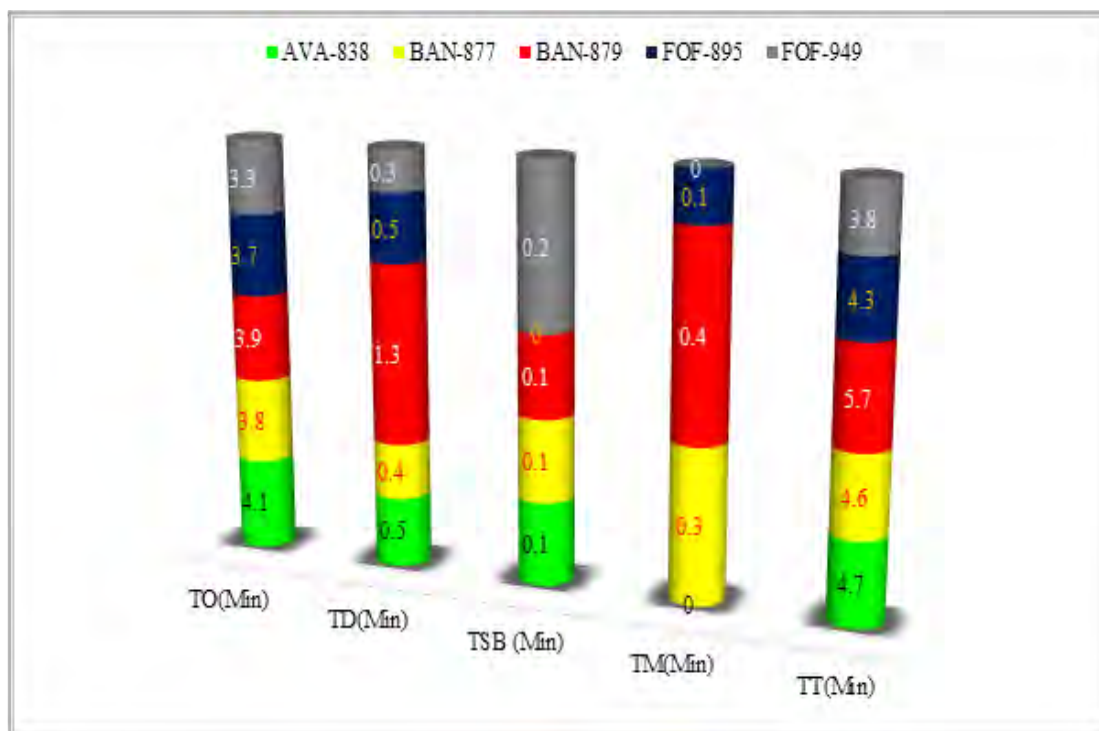
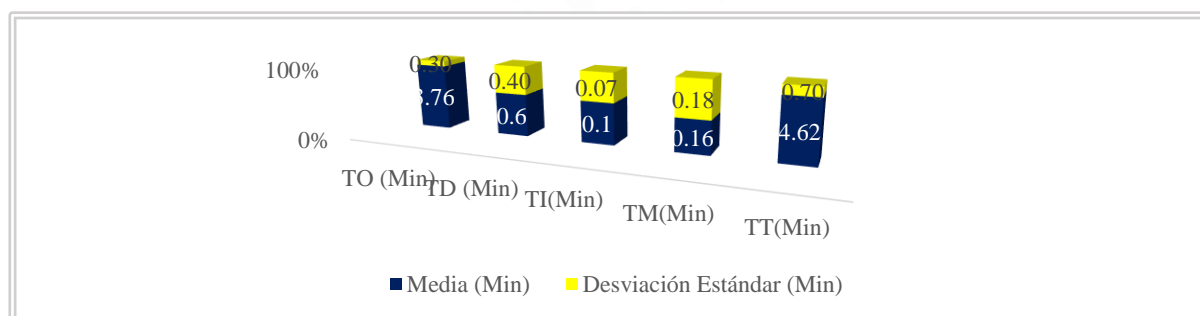


Figura 11 Tiempos de carguío Nota: Elaboración propia

En la figura anterior, el Tiempo Operativo (TO) oscila entre 3.3 y 4.1 minutos, lo que refleja una estabilidad en el tiempo durante el cual los volquetes están en funcionamiento efectivo. No obstante, el Tiempo de Demora (TD) presenta una variabilidad considerable, con valores que van desde 0.3 hasta 1.3 minutos. Esta variabilidad sugiere que algunos volquetes experimentan periodos de inactividad notablemente más largos, lo que constituye la principal fuente de fluctuación en el Tiempo Total (TT), que se sitúa entre 3.8 y 5.7 minutos. El Tiempo de Inactividad (TI) se mantiene bajo y estable, mientras que el Tiempo de Mantenimiento (TM) es igualmente reducido y constante. En resumen, la variabilidad en el Tiempo Total se debe principalmente a las diferencias significativas en el Tiempo de Demora entre los volquetes, lo que indica que optimizar los periodos de inactividad podría mejorar la eficiencia global.

Tabla 7*Tiempos, Promedio y desviación estándar*

| Tipo de tiempo | Media (Min) | Desviación Estándar (Min) |
|-----------------------|--------------------|----------------------------------|
| TO (Min) | 3.76 | 0.30 |
| TD (Min) | 0.6 | 0.40 |
| TI(Min) | 0.1 | 0.07 |
| TM(Min) | 0.16 | 0.18 |
| TT(Min) | 4.62 | 0.70 |

Nota: Elaboración propia*Figura 12 Promedio y desviación gráfica*

La figura anterior indica que el Tiempo Operativo (TO) presenta una media de 3.76 minutos con una desviación estándar de 0.30 minutos, lo que sugiere que los tiempos de operación de los volquetes son relativamente uniformes. En contraste, el Tiempo de Demora (TD) muestra una media de 0.60 minutos, pero con una desviación estándar notablemente alta de 0.40 minutos, lo que refleja una considerable variabilidad en los periodos de inactividad. Esta alta variabilidad en el TD implica que los volquetes experimentan tiempos de inactividad muy diversos, afectando de manera significativa al Tiempo Total (TT), que tiene una media de 4.62 minutos y una desviación estándar de 0.70 minutos. Aunque el Tiempo de Inactividad (TI) y el Tiempo de Mantenimiento (TM) son relativamente bajos y estables, la alta variabilidad en el Tiempo de Demora se destaca como el principal factor que contribuye a la variabilidad en el Tiempo Total. Por lo tanto, se sugiere que la reducción de esta variabilidad en el Tiempo de Demora podría ser fundamental para optimizar la eficiencia operativa y mejorar la consistencia en el Tiempo Total de los volquetes.

5.2.2 Medir.



Figura 13 Ciclo de Carguío Nota: Elaboración Propia

En la tabla siguiente se presentan los tiempos promedios por ciclo correspondientes a 9 volquetes que desempeñan la función específica de carguío de mineral en la ruta entre el Tajo Santa Rosa y la Placa 5 A.

Tabla 8

Tiempo Operando Efectivo Excavadora EC380

| Volquete | Tiempo Cargando (Min) | Tiempo Acomodo (Min) | Hang (Min) | Tiempo Operando Promedio por ciclo (Min) |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|---|
| AWG-822 | 3.02 | 0.79 | 0.2 | 4.01 |
| AXU-847 | 1.36 | 0.83 | 0.34 | 2.53 |
| BAO-755 | 1.82 | 0.53 | 0.13 | 2.48 |
| BAQ-827 | 1.62 | 1 | 0.24 | 2.86 |
| BCY-789 | 1.78 | 0.76 | 0.23 | 2.77 |
| BHI-841 | 1.22 | 0.46 | 0.24 | 1.92 |
| FOG-716 | 2.25 | 0.93 | 0.22 | 3.4 |
| FOG-733 | 1.8 | 0.81 | 0.23 | 2.84 |
| FQF-949 | 1.39 | 0.81 | 0.23 | 2.43 |

Nota. Elaboración propia

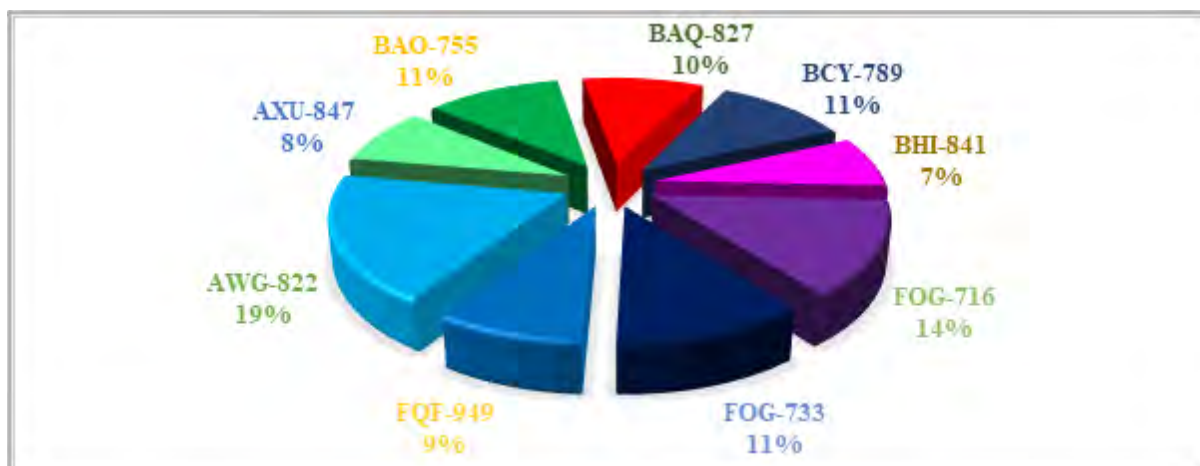


Figura 14 Tiempo cargando

En la figura anterior se muestra que el Volquete AWG-822 presenta el mayor tiempo de carga lo cual representa un 19%, dando a entender que enfrenta desafíos adicionales durante el proceso de carga, mientras que BHI-841 es el más eficiente con el 7%.

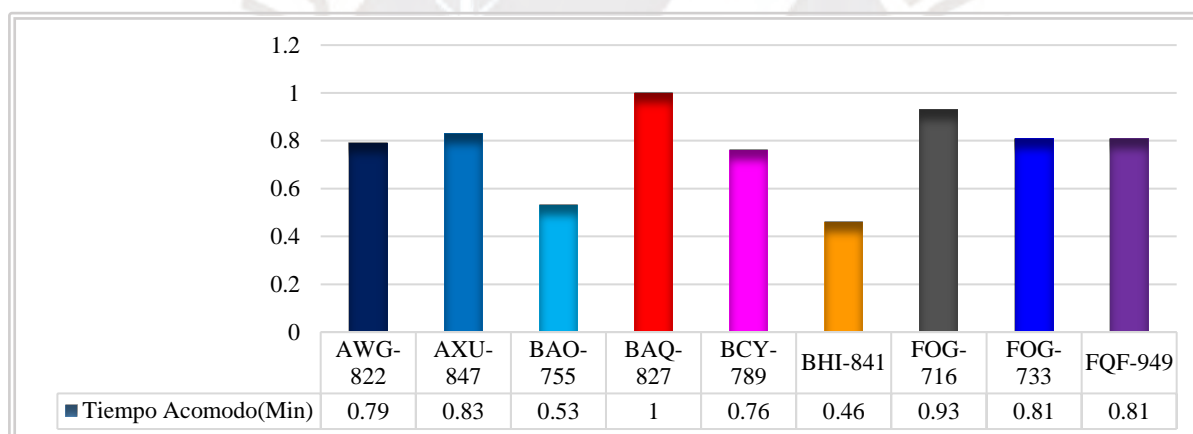


Figura 15 Tiempo acomodo

En los tiempos de ajuste para los volquetes, el valor máximo es de 1 minuto para BAQ-827, lo que indica que este volquete necesita el mayor tiempo para completar esta etapa. Esto podría sugerir que BAQ-827 enfrenta procesos adicionales o desafíos específicos en su ajuste. En contraste, el valor mínimo es de 0.46 minutos para BHI-841, mostrando que este volquete tiene el ajuste más rápido y eficiente. La diferencia entre el máximo y el mínimo (0.54 minutos) revela una variabilidad en la eficiencia del ajuste entre los diferentes volquetes, destacando a BHI-841 por su rapidez en esta etapa.

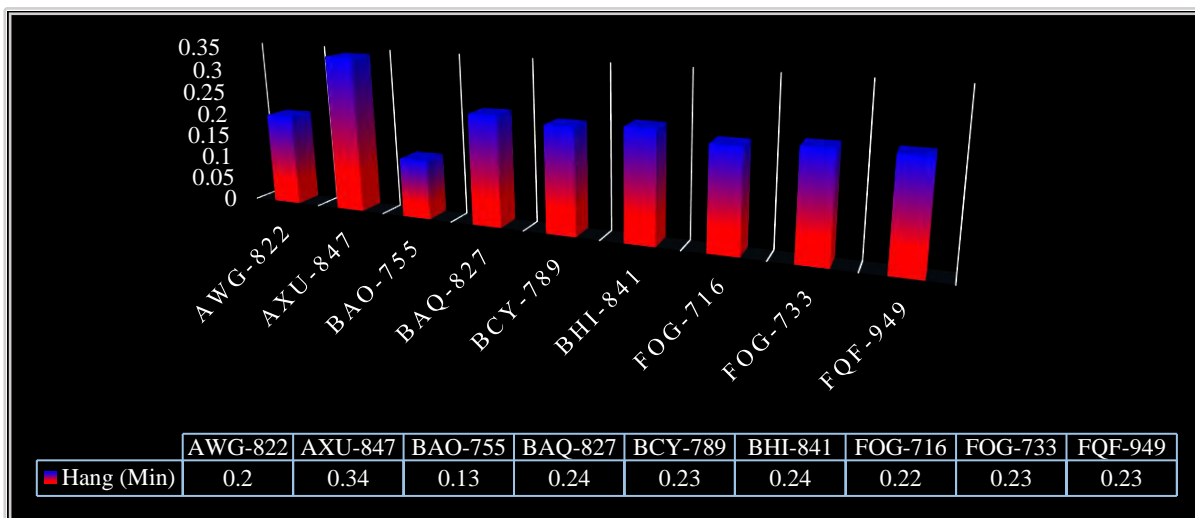


Figura 16 Tiempo de espera

En la figura anterior, el volquete AXU-847 tiene el mayor tiempo de espera con 0.34 minutos, lo que indica posibles ineficiencias o retrasos. En contraste, el volquete BAO-755 muestra el tiempo de espera más corto de 0.13 minutos, reflejando una alta eficiencia. La diferencia de 0.21 minutos entre el máximo y el mínimo sugiere una notable variabilidad en el rendimiento de los volquetes en esta etapa.

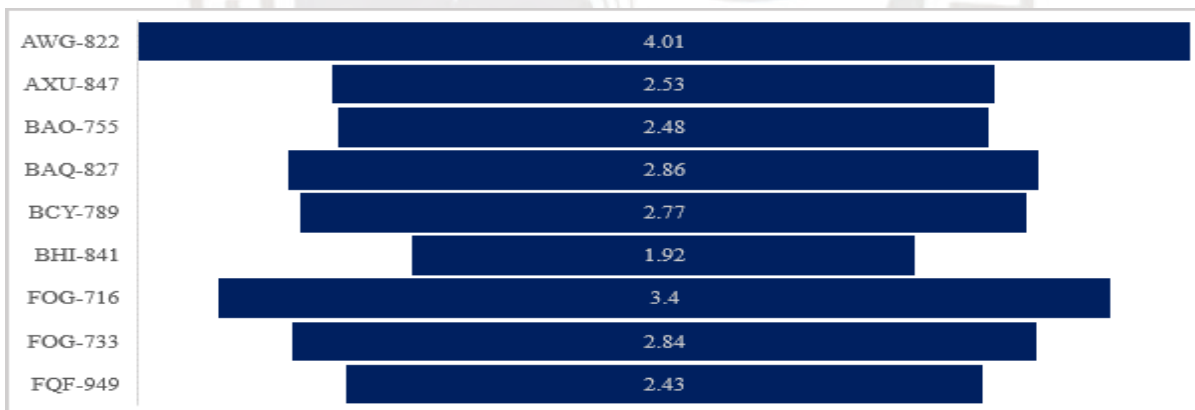


Figura 17 Tiempo Operando Promedio por ciclo

El volquete AWG-822 tiene el mayor tiempo operativo promedio por ciclo con 4.01 minutos, indicando que es el menos eficiente en términos de tiempo. En contraste, BHI-841 tiene el menor tiempo operativo promedio con 1.92 minutos, mostrando la mayor eficiencia en esta etapa. Los tiempos promedio de los otros volquetes varían entre 2.43 y 3.4 minutos, con FOG-716 destacándose con un tiempo relativamente alto. Esta variabilidad en los tiempos operativos sugiere diferencias en la eficiencia de los volquetes durante el ciclo de operación.

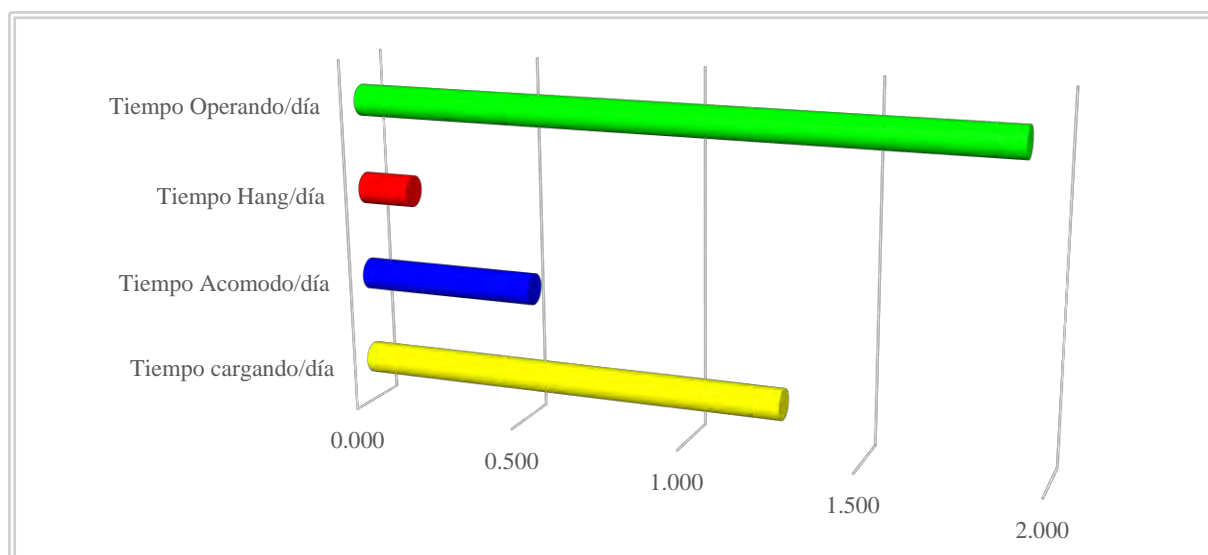


Figura 18 Tiempos del ciclo de Carguío

En el ciclo de carguío, la mayor parte del tiempo se dedica al proceso de carga, con un total de 1.269 horas por día. El tiempo de acomodo es de 0.527 horas por día, mientras que el tiempo de espera (Hang) es de solo 0.154 horas por día. El tiempo operativo promedio por día es de 1.907 horas. Esto sugiere que, aunque el tiempo de llenado y espera es mínimo, el tiempo dedicado a la carga podría beneficiarse de una optimización. Mejorar la eficiencia en el proceso de carga y acomodo podría reducir el tiempo total del ciclo y aumentar la eficiencia operativa.

Tabla 9

Parámetros de productividad

| Métrica | Fórmula | Valor | Unidad | Valor | Unidad |
|---------------------------|--|--------|--------------------|--------|--------------------|
| Espera carguío | Tiempo esperando Hang/Tiempo Operando Efectivo | 0.08 | Número | 8.08 | % |
| Tiempo de espera | Tiempo esperando Hang/#Viajes promedio por día | 1.848 | Min | 0.031 | Hr |
| Productividad Instantánea | m ³ /Tiempo cargando | 12.605 | m ³ /Hr | 22.689 | Ton/Hr |
| Productividad Efectiva | m ³ /(Tiempo cargando+Tiempo acomodo) | 8.907 | m ³ /Hr | 16.033 | m ³ /Hr |
| Productividad Operativa | m ³ /Tiempo operando por día | 8.392 | m ³ /Hr | 15.106 | m ³ /Hr |

La tabla revela que, aunque la productividad instantánea durante el carguío es alta, con 12.605 m³/hora, la eficiencia operativa global se ve afectada por tiempos de espera prolongados, que representan el 68.29% del tiempo operativo efectivo. Esto resulta en una productividad efectiva de 8.907 m³/hora y una productividad operativa de 8.392 m³/hora. La alta proporción de tiempo dedicado a espera reduce significativamente la productividad general y sugiere que gran parte del tiempo total se destina a actividades no productivas, impactando negativamente el rendimiento del proceso. Optimizar la gestión del tiempo de espera podría mejorar la eficiencia y aumentar la productividad general.

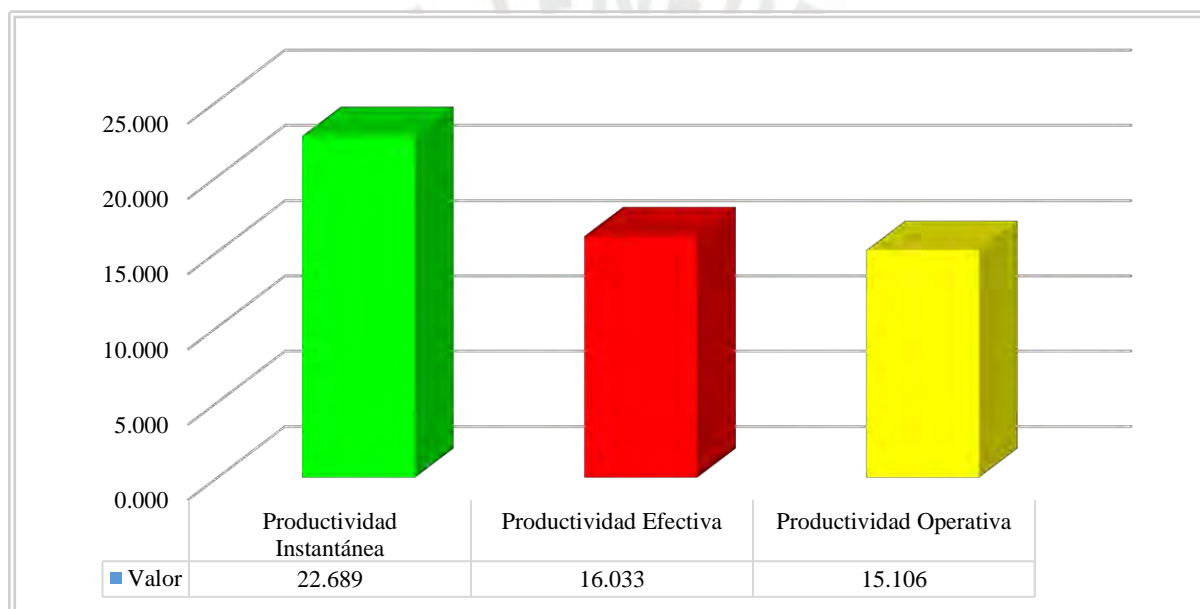


Figura 19 Productividad Operativa, Efectiva e Instantánea

En la flota minera, aunque la capacidad de carga es alta con una productividad instantánea de 22.689 Ton/Hr, la eficiencia global se ve afectada por tiempos no productivos, como el acomodo y la espera. Esto reduce la productividad efectiva a 16.033 m³/Hr y la productividad operativa a 15.106 m³/Hr, indicando que una parte significativa del tiempo operativo no se dedica directamente a actividades productivas, lo que impacta negativamente el rendimiento total.

Tabla 10*Tiempo efectivo en la unidad minera*

| Tiempo Operando Efectivo | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------|
| Tiempo de Viaje Vacío | Tiempo de Cola | Tiempo de Acomodo | Tiempo Cuadrado | Tiempo Cargando | Tiempo de Viaje Cargado | Tiempo de Espera de Descarga | Tiempo retrocediendo | Tiempo Descargando |

Nota: Proporcionado por la unidad minera**Tabla 11***Tiempos por los 9 volquetes parte 1*

| Volquetes | Tiempo de Viaje Vacío | Tiempo de Cola | Tiempo de Acomodo | Tiempo Cuadrado | Tiempo Cargando |
|------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| AWG-822 | 26 | 4.3 | 0.9 | 1.7 | 3.02 |
| AXU-847 | 29 | 4.2 | 1 | 1.9 | 1.36 |
| BAO-755 | 30.6 | 4.7 | 1.3 | 1 | 1.82 |
| BAQ-827 | 25.5 | 6.6 | 0.8 | 1.2 | 1.62 |
| BCY-789 | 25.9 | 7.9 | 0.8 | 0.9 | 1.78 |
| BHI-841 | 26.1 | 5.3 | 1.4 | 1.5 | 1.22 |
| FOG-716 | 32.1 | 4.9 | 0.9 | 1.2 | 2.25 |
| FOG-733 | 30.1 | 7.9 | 1 | 1.5 | 1.8 |
| FQF-949 | 29.4 | 5.2 | 1.2 | 1.9 | 1.39 |

Nota: Análisis en base a evaluación en campo

Tabla 12

Tiempos por los 9 volquetes parte 2

| Volquetes | Tiempo de Viaje Cargado | Tiempo de Espera de Descarga | Tiempo retrocediendo | Tiempo Descargando | Tiempo Operando Total | Número de Viajes por día |
|-----------|-------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| AWG-822 | 54.2 | 2.9 | 0.9 | 0.8 | 94.72 | 5 |
| AXU-847 | 66.8 | 2.3 | 0.5 | 0.3 | 107.36 | 4 |
| BAO-755 | 71.1 | 2.5 | 0.3 | 0.2 | 113.52 | 5 |
| BAQ-827 | 56.4 | 2.4 | 0.6 | 0.4 | 95.52 | 4 |
| BCY-789 | 51.1 | 2.8 | 0.6 | 0.3 | 92.08 | 5 |
| BHI-841 | 63.2 | 1.9 | 0.4 | 0.3 | 101.32 | 4 |
| FOG-716 | 60.2 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 103.15 | 6 |
| FOG-733 | 78.4 | 1.5 | 0.8 | 0.2 | 123.2 | 4 |
| FQF-949 | 76.4 | 2.2 | 0.9 | 0.3 | 118.89 | 4 |

Nota: Análisis en base a evaluación en campo

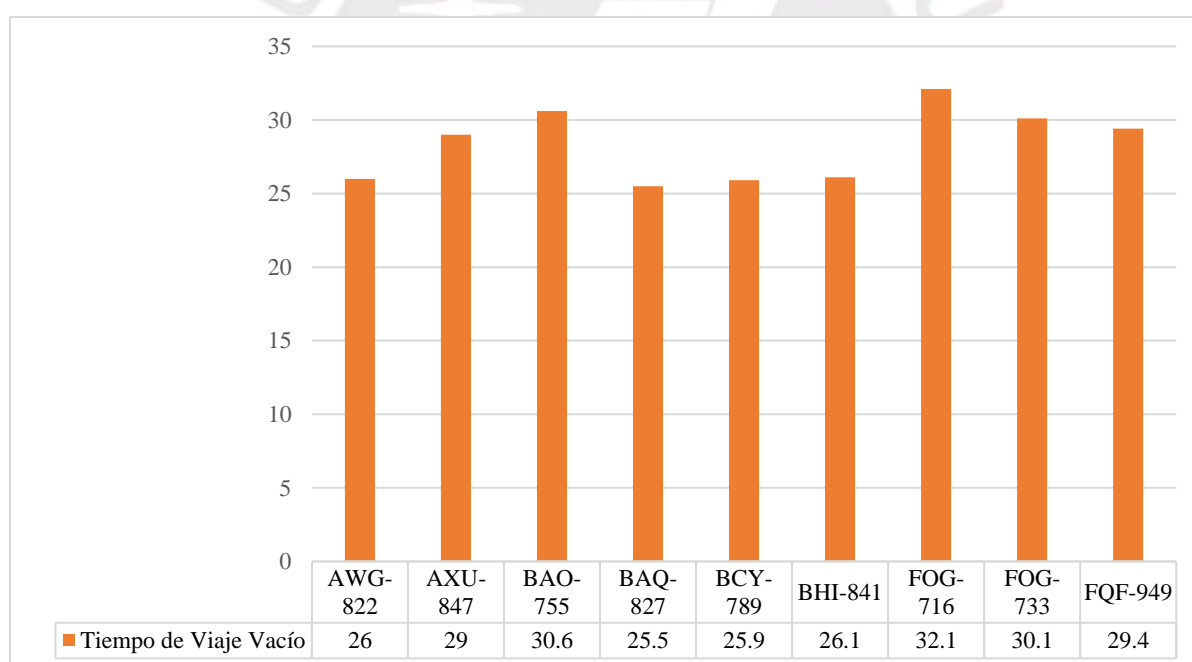


Figura 20 Tiempo de Viaje Cargado 9 volquetes

Los tiempos de viaje vacío de los volquetes muestran una variabilidad que afecta la eficiencia operativa. FOG-716 registra el mayor tiempo con 32.1 minutos, posiblemente debido a una mayor distancia o condiciones adversas, mientras que BAQ-827 tiene el menor tiempo con 25.5 minutos, lo que sugiere una ruta más eficiente. Optimizar estos tiempos es esencial para mejorar la productividad y la capacidad de transporte en la operación minera.

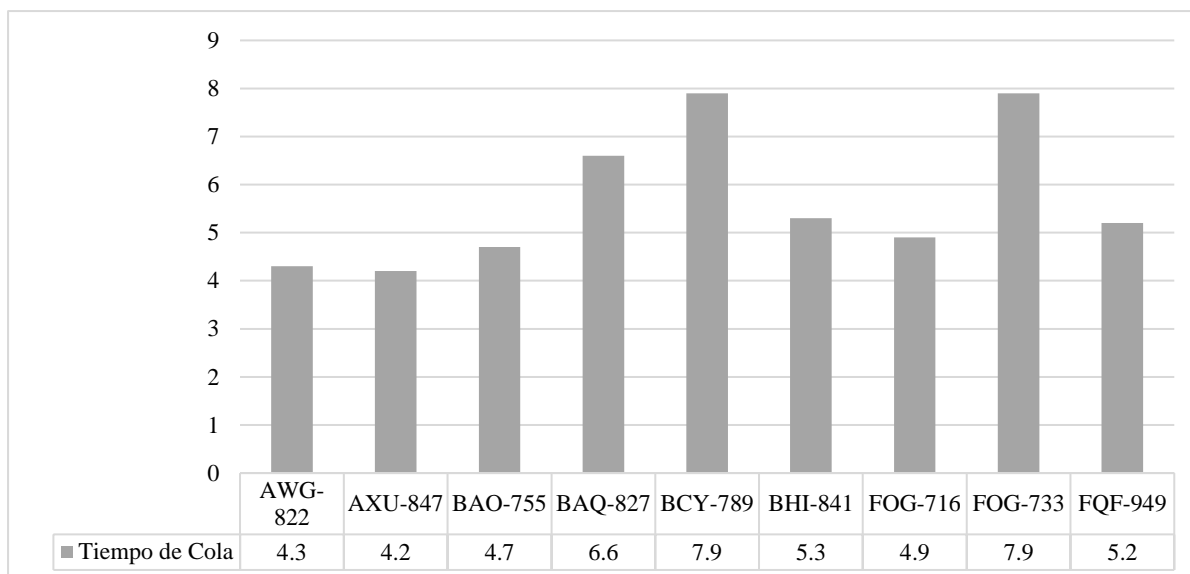


Figura 21 Tiempo de Cola de 9 volquetes

Los tiempos de cola varían entre 4.2 y 7.9 minutos, indicando ineficiencias. BCY-789 y FOG-733 presentan los mayores tiempos, lo que sugiere congestión o demoras en el proceso, afectando la fluidez operativa. Optimizar estos tiempos podría mejorar la eficiencia global.

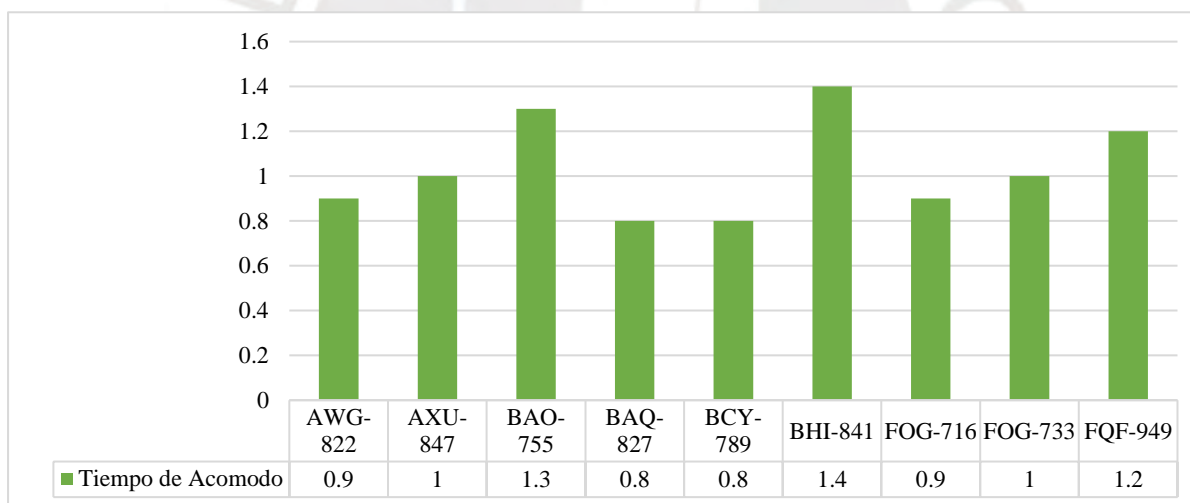


Figura 22 Tiempo de Acomodo de 9 volquetes

Los tiempos de acomodo de los volquetes varían entre 0.8 y 1.4 minutos, con BHI-841 registrando el mayor tiempo (1.4 minutos), lo que podría indicar desafíos en la alineación o maniobrabilidad. Por otro lado, BAQ-827 y BCY-789 tienen los tiempos más bajos (0.8 minutos), sugiriendo mayor eficiencia en el posicionamiento. Reducir estos tiempos en los volquetes menos eficientes podría mejorar la productividad y reducir los tiempos de ciclo en las operaciones mineras.

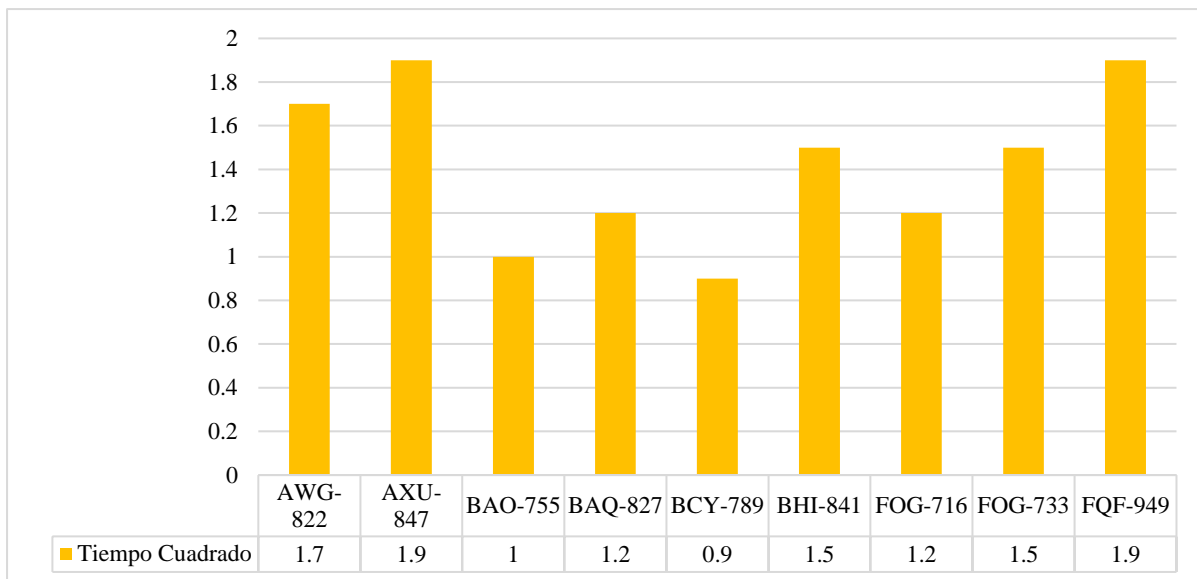


Figura 23 Tiempo Cuadrado de 9 volquetes

Los tiempos cuadrados de los volquetes varían de 0.9 a 1.9 minutos. AXU-847 y FQF-949 tienen los tiempos más altos (1.9 minutos), lo que podría indicar dificultades en la estabilización o ajustes antes de la carga. BCY-789 registra el tiempo más bajo (0.9 minutos), sugiriendo una mayor eficiencia en esta etapa. Optimizar los tiempos en los volquetes más lentos podría mejorar la eficiencia general y reducir los ciclos operativos en las operaciones mineras.

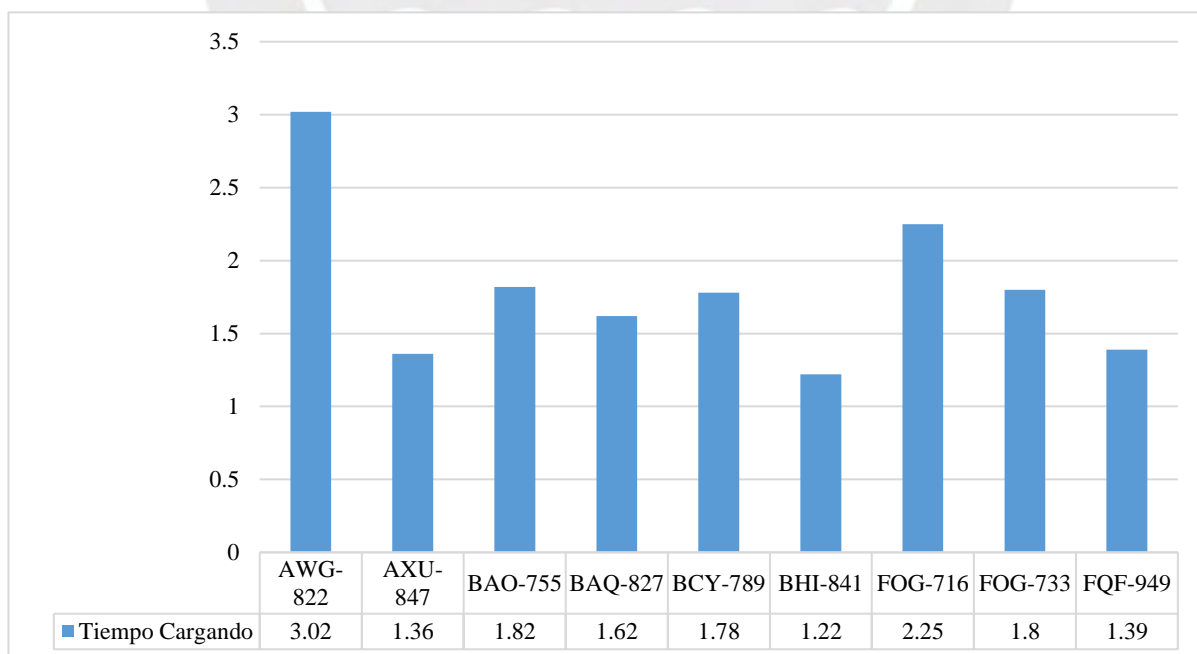


Figura 24 Tiempo Cargando de 9 volquetes

Los tiempos de carga de los volquetes varían entre 1.22 y 3.02 minutos. AWG-822 tiene el tiempo de carga más largo (3.02 minutos), lo que podría indicar una mayor capacidad o dificultades en el proceso de carga. En contraste, BHI-841 registra el tiempo más corto (1.22 minutos), lo que sugiere mayor eficiencia en el llenado. Optimizar los tiempos de carga, especialmente en los volquetes con tiempos más largos, podría mejorar la productividad y la eficiencia operativa.



Figura 25 Tiempo de viaje cargado de 9 volquetes

Los tiempos de viaje cargado de los volquetes oscilan entre 51.1 y 78.4 minutos. FOG-733 presenta el tiempo más largo (78.4 minutos), lo que podría indicar distancias mayores o condiciones más difíciles durante el transporte. BCY-789 tiene el tiempo más corto (51.1 minutos), sugiriendo una ruta más eficiente. Reducir los tiempos de viaje cargado en volquetes más lentos podría aumentar la eficiencia general de la operación minera.

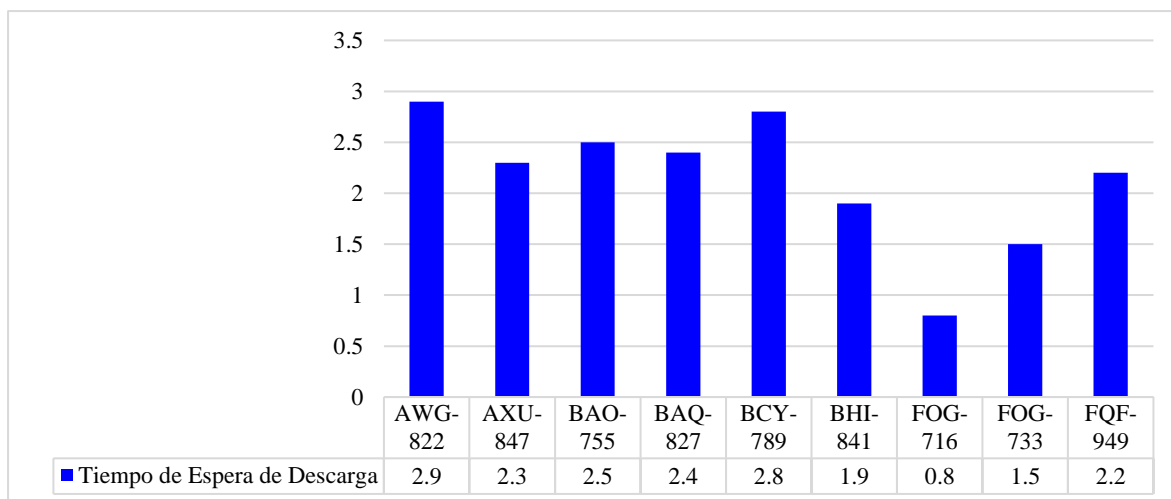


Figura 26 Tiempo de espera de descarga de 9 volquetes

El tiempo de espera de descarga para los volquetes varía entre 0.8 y 2.9 minutos. El volquete FOG-716 muestra el menor tiempo de espera (0.8 minutos), indicando una mayor eficiencia en la descarga, mientras que el volquete AWG-822 presenta el mayor tiempo de espera (2.9 minutos), sugiriendo posibles ineficiencias o cuellos de botella. Estos datos pueden ayudar a identificar y optimizar procesos operativos para mejorar la eficiencia en la gestión de volquetes.

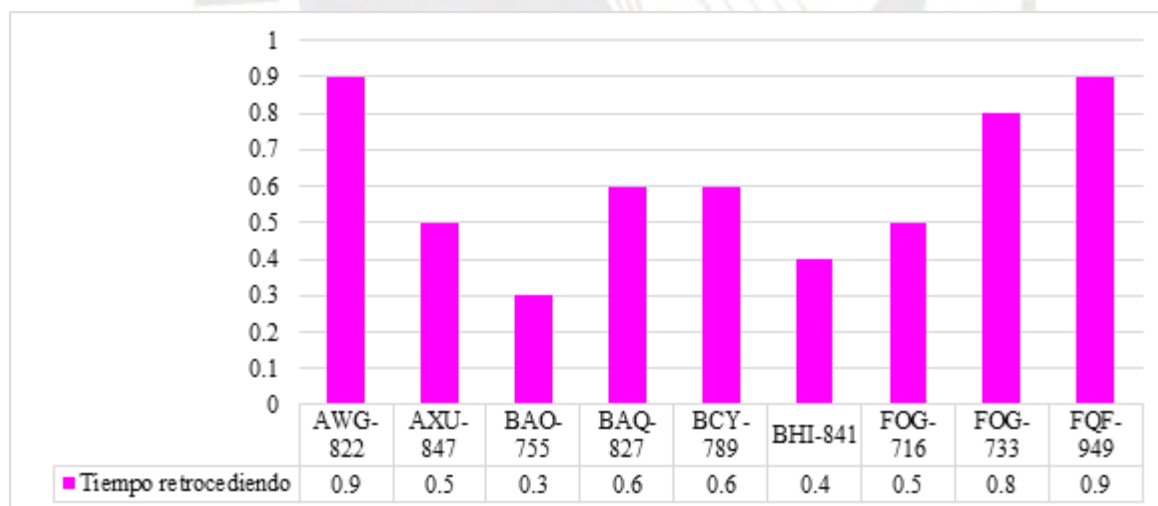


Figura 27 Tiempo retrocediendo de 9 volquetes

El tiempo de retroceso de los volquetes varía de 0.3 a 0.9 minutos. Los volquetes BAO-755 y BAQ-827 tienen el menor tiempo de retroceso (0.3 y 0.6 minutos, respectivamente), indicando un proceso de retroceso más eficiente. En contraste, los volquetes AWG-822 y FQF-949 tienen el mayor tiempo de retroceso (0.9 minutos), lo que puede señalar posibles

ineficiencias en el proceso. Estos datos sugieren áreas de mejora en la maniobrabilidad de los volquetes para optimizar el tiempo de retroceso.

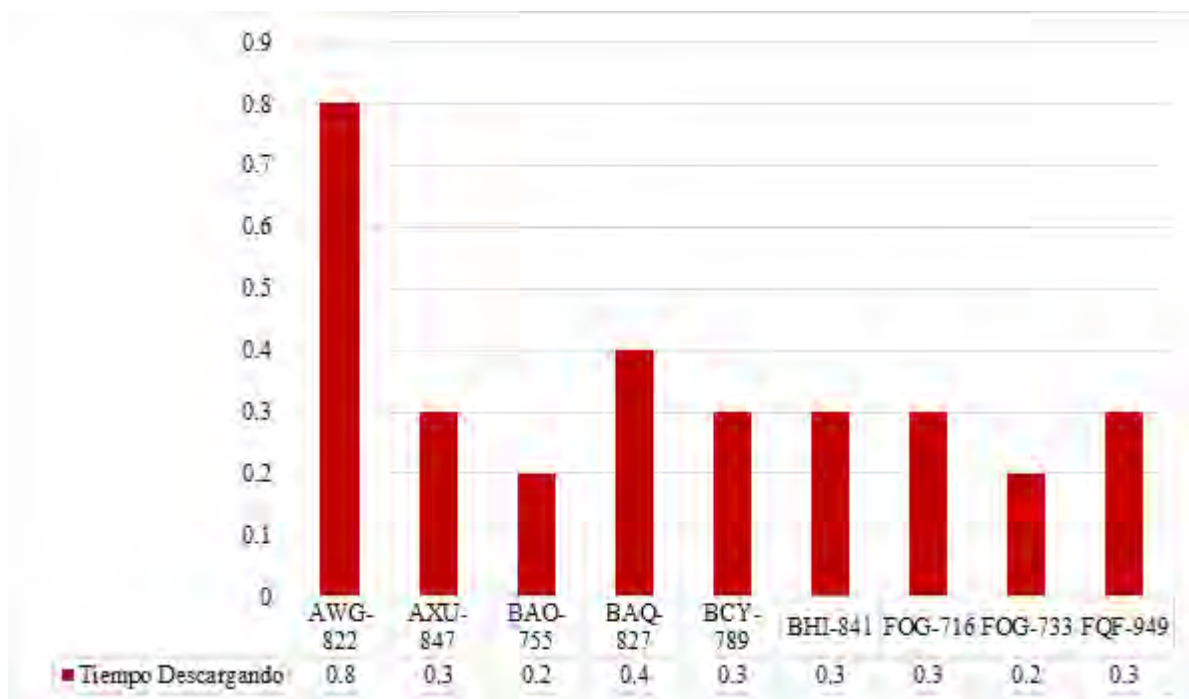


Figura 28 Tiempo descargando de 9 volquetes

El tiempo de descarga para los volquetes oscila entre 0.2 y 0.8 minutos. Los volquetes BAO-755 y FOG-733 muestran los tiempos de descarga más rápidos (0.2 minutos), lo que sugiere una alta eficiencia en el proceso. En contraste, el volquete AWG-822 presenta el mayor tiempo de descarga (0.8 minutos), indicando una posible ineficiencia en la operación. Estos datos podrían usarse para identificar volquetes que necesitan ajustes operativos para mejorar la eficiencia de descarga.

Tabla 13*Fórmulas de indicadores de acarreo*

| Métrica | Fórmula |
|---------------------------|---|
| Cola de acarreo (%) | Tiempo Cola/Tiempo operando efectivo |
| Tiempo de cola (Min) | Tiempo cola*N° de viajes |
| Productividad (Ton/Hr) | Toneladas/Tiempo operando efectivo |
| Velocidad vacía (Km/Hr) | Distancia en Km/Tiempo de Viaje Vacío |
| Velocidad cargada (Km/Hr) | Distancia de Km/Tiempo de Viaje Cargado |
| PayLoad | Peso total-Tara |

Tabla 14*Datos tomados en Campo de indicadores de acarreo*

| Volquetes | Cola de acarreo (%) | Tiempo de cola (Min) | Productividad (Ton/Hr) | Velocidad vacía (Km/Hr) | Velocidad cargada (Km/Hr) | PayLoad | Peso Total (Ton) |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------|
| AWG-822 | 4.54% | 21.50 | 18.24 | 5.86 | 2.81 | 39.00 | 55 |
| AXU-847 | 3.91% | 16.80 | 16.10 | 5.26 | 2.28 | 37.00 | 53 |
| BAO-755 | 4.14% | 23.50 | 15.22 | 4.98 | 2.14 | 40.00 | 56 |
| BAQ-827 | 6.91% | 26.40 | 18.09 | 5.98 | 2.70 | 37.00 | 53 |
| BCY-789 | 8.58% | 39.50 | 18.77 | 5.88 | 2.98 | 37.00 | 53 |
| BHI-841 | 5.23% | 21.20 | 17.05 | 5.84 | 2.41 | 38.00 | 54 |
| FOG-716 | 4.75% | 29.40 | 16.75 | 4.75 | 2.53 | 38.00 | 54 |
| FOG-733 | 6.41% | 31.60 | 14.03 | 5.06 | 1.94 | 39.00 | 55 |
| FQF-949 | 4.37% | 20.80 | 14.53 | 5.18 | 1.99 | 40.00 | 56 |

Nota: Elaboración propia

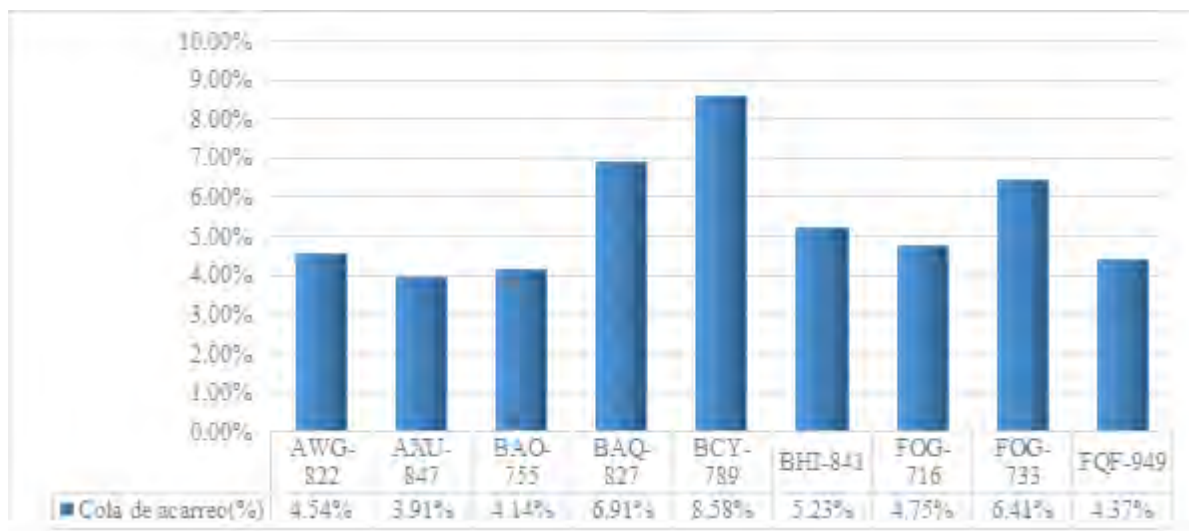


Figura 29 Cola de acarreo (%)

Los porcentajes de cola de acarreo de los volquetes varían entre 3.91% y 8.58%. El volquete BCY-789 presenta el mayor porcentaje (8.58%), indicando una mayor acumulación o tiempo de espera en comparación con los demás. En contraste, el volquete AXU-847 tiene el menor porcentaje (3.91%), sugiriendo una eficiencia superior en el acarreo. Estos datos pueden señalar áreas para mejorar la gestión y optimización del tiempo de acarreo de los volquetes.

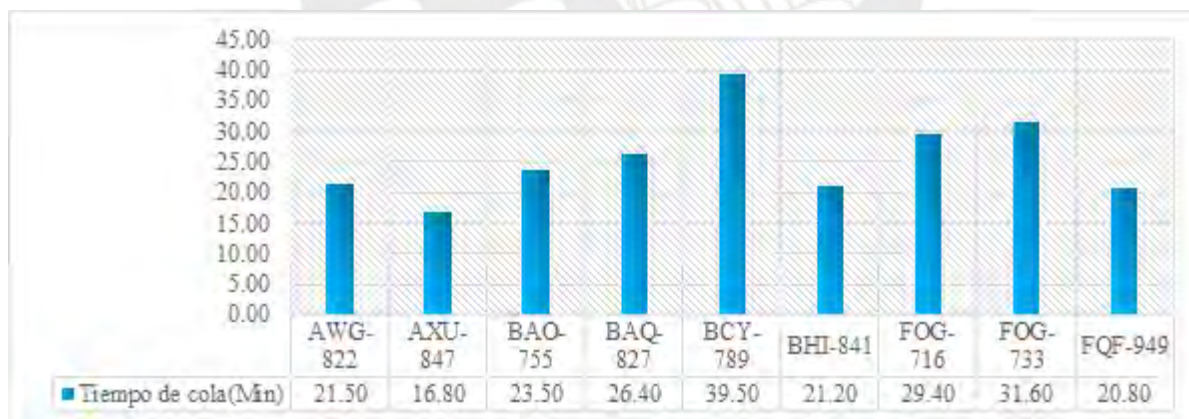


Figura 30 Tiempo de cola

El tiempo de cola varía entre 16.80 y 39.50 minutos. El volquete AXU-847 tiene el menor tiempo de cola (16.80 minutos), sugiriendo una gestión más eficiente del tiempo de espera. Por otro lado, el volquete BCY-789 presenta el mayor tiempo de cola (39.50 minutos), indicando posibles problemas en la eficiencia operativa. Estos datos pueden ayudar a identificar volquetes

que requieren ajustes para reducir los tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa general.

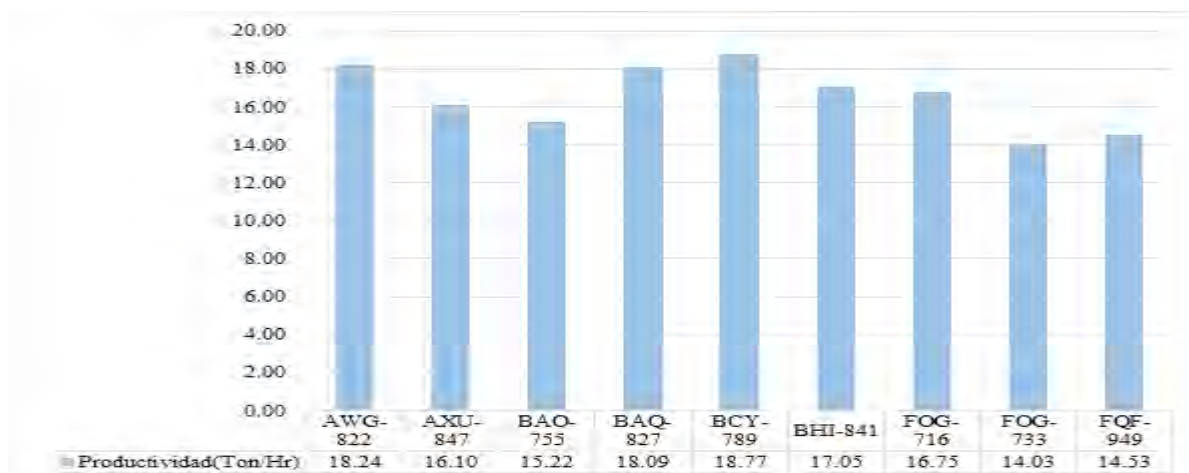


Figura 31 Productividad

La productividad de los volquetes varía de 14.03 a 18.77 toneladas por hora. El volquete BCY-789 muestra la mayor productividad (18.77 ton/hr), indicando una alta eficiencia en el transporte de material. En contraste, el volquete FOG-733 tiene la menor productividad (14.03 ton/hr), lo que sugiere una menor eficiencia. Estos datos permiten identificar los volquetes más y menos eficientes, proporcionando información útil para optimizar las operaciones y mejorar la productividad general.

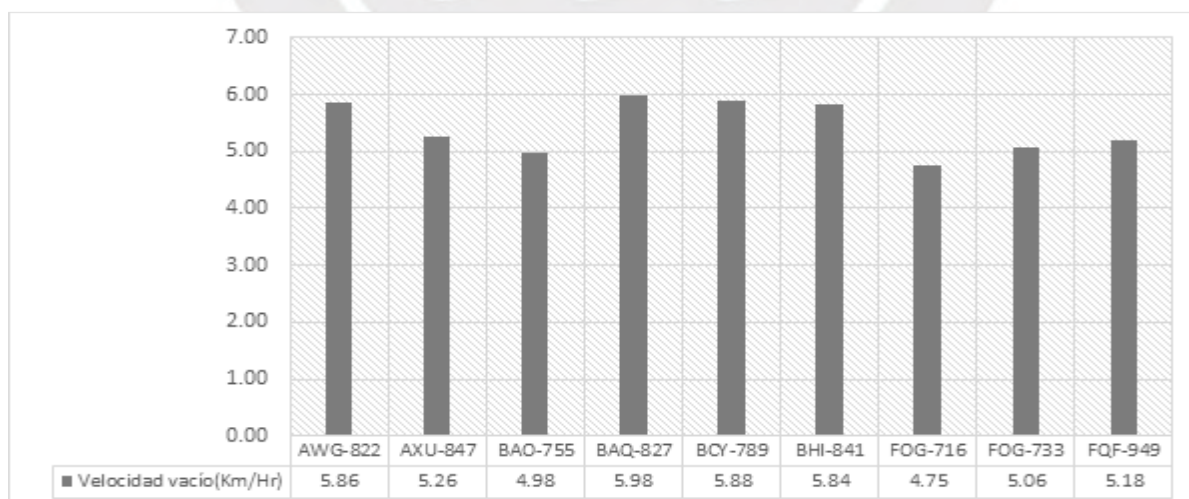


Figura 32 Velocidad Volquetes Vacíos

La velocidad vacía de los volquetes varía entre 4.75 y 5.98 km/h. El volquete BAQ-827 presenta la mayor velocidad vacía (5.98 km/h), sugiriendo un mejor rendimiento en el

desplazamiento sin carga. Por otro lado, el volquete FOG-716 tiene la menor velocidad vacía (4.75 km/h), lo que puede indicar una menor eficiencia en el desplazamiento. Estos datos son útiles para evaluar y mejorar la velocidad operativa de los volquetes en condiciones vacías.

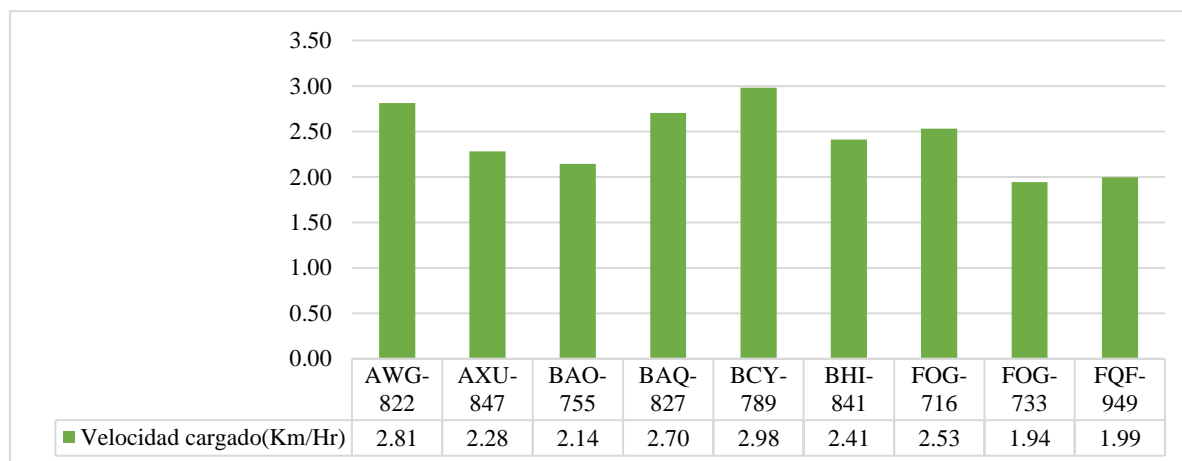


Figura 33 Velocidad Volquetes Cargados

La velocidad cargada de los volquetes varía de 1.94 a 2.98 km/h. El volquete BCY-789 muestra la mayor velocidad cargada (2.98 km/h), indicando una mejor eficiencia en el transporte de carga. En contraste, el volquete FOG-733 tiene la menor velocidad cargada (1.94 km/h), sugiriendo una menor eficiencia. Estos datos son clave para evaluar la capacidad de los volquetes para mantener velocidades operativas efectivas bajo carga, lo que afecta la eficiencia general del transporte.

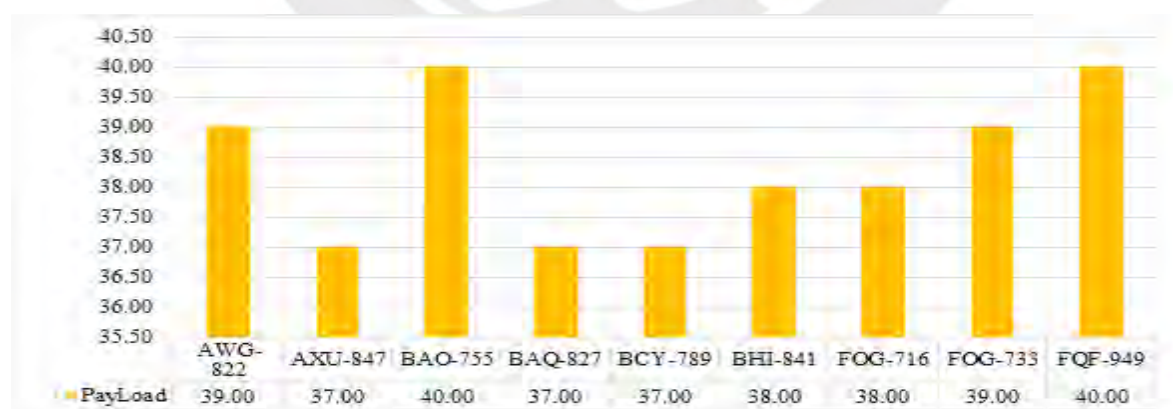


Figura 34 PayLoad

El payload de los volquetes varía entre 37.00 y 40.00 toneladas. Los volquetes BAO-755 y FQF-949 tienen el mayor payload (40.00 toneladas), indicando una capacidad máxima de

carga. Los volquetes AXU-847, BAQ-827 y BCY-789 tienen el payload más bajo (37.00 toneladas), lo que sugiere una capacidad ligeramente menor. Estos datos son esenciales para evaluar la capacidad de carga y optimizar la eficiencia del transporte de material en función de las necesidades operativas.

5.2.3 Analizar.

En base a los cálculos realizados anteriormente para el ciclo de carguío, nos centraremos en los tiempos promedio de cada uno de los volquetes teniendo así la siguiente tabla y figura para una mejor interpretación.

Tabla 15

Tiempo Promedio por ciclo (min)

| Volquete | Tiempo Promedio por ciclo (min) |
|-----------------|--|
| AWG-822 | 4.01 |
| AXU-847 | 2.53 |
| BAO-755 | 2.48 |
| BAQ-827 | 2.86 |
| BCY-789 | 2.77 |
| BHI-841 | 1.92 |
| FOG-716 | 3.4 |
| FOG-733 | 2.78 |
| FQF-949 | 3.37 |

Nota: Elaboración propia

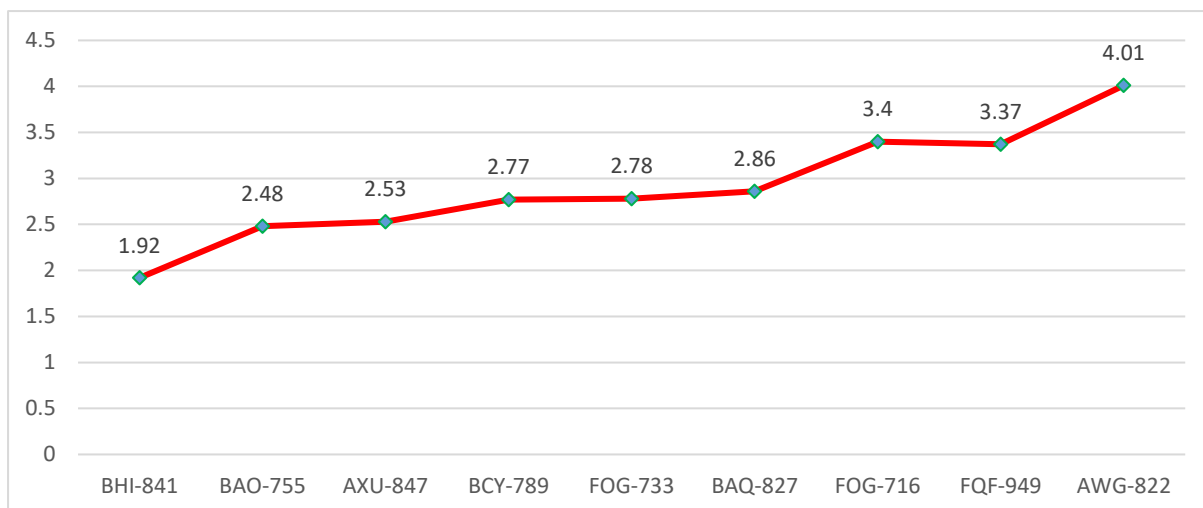


Figura 35 Tiempos generales por ciclo de carguío

En base a la figura anterior el volquete BHI-841 tiene el tiempo promedio por ciclo más bajo con 1.92 minutos, lo que indica que es el más rápido en completar un ciclo. Esto puede sugerir una mayor eficiencia operativa o condiciones más favorables para este volquete en particular. Por otro lado, el volquete AWG-822 presenta el tiempo promedio por ciclo más alto con 4.01 minutos, lo que indica que es el más lento, y podría estar enfrentando condiciones óptimas o posibles ineficiencias.

Tabla 16

Media y desviación estándar

| <i>Media y Desviación Estándar</i> | |
|------------------------------------|-------|
| Media | 2.902 |
| Desviación estándar | 0.613 |

Nota: Elaboración propia

La media de 2.902 minutos indica que, en promedio, los volquetes tardan alrededor de este tiempo para completar un ciclo. La desviación estándar de 0.613 minutos revela que los tiempos de ciclo están bastante cercanos a este promedio, lo que sugiere que los volquetes son consistentes en su rendimiento, con pocas variaciones significativas en sus tiempos de operación. Esto implica una operación estable y predecible en el ciclo de trabajo de los volquetes.

Tabla 17

Identificación de Valores Atípicos

| Identificación de Valores Atípicos: Boxplot | | |
|---|----------|-------|
| Cuartil 1(Q1) | | 2.53 |
| Cuartil 2(Q2) | | 2.78 |
| Cuartil 3(Q3) | | 2.78 |
| Rango Intercuartil (IQR) | | 0.25 |
| Valores Atípicos | Inferior | 2.155 |
| | Superior | 3.155 |

Nota: Elaboración propia

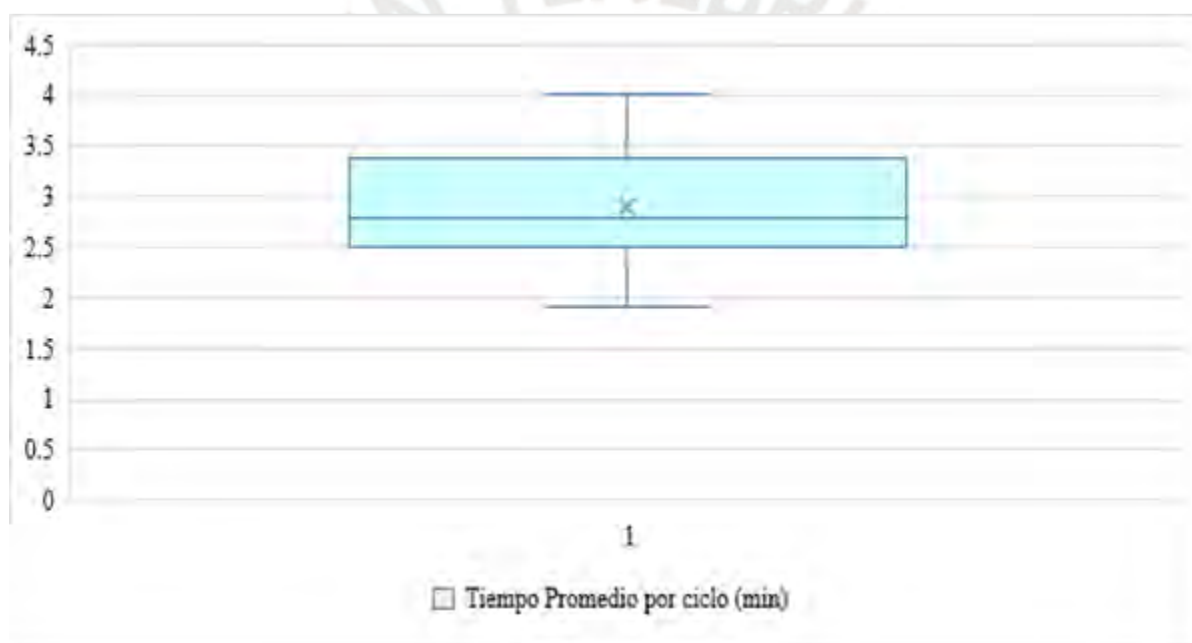


Figura 36 Boxplot de tiempos promedio

El análisis de cuartiles y el rango intercuartil (IQR) revela que la mayoría de los tiempos promedio por ciclo de los volquetes se agrupan estrechamente alrededor de la mediana de 2.78 minutos, con una variabilidad moderada (IQR de 0.25 minutos). Los valores atípicos se identifican por debajo de 2.155 minutos y por encima de 3.155 minutos. En este caso, el volquete BHI-841 (1.92 minutos) es notablemente más rápido y se considera un valor atípico

inferior, mientras que FOG-716 (3.4 minutos), FQF-949 (3.37 minutos) y AWG-822 (4.01 minutos) son más lentos y se consideran valores atípicos superiores. Estos valores atípicos indican que, aunque la mayoría de los volquetes tienen tiempos de ciclo similares, algunos presentan rendimientos significativamente diferentes, lo cual podría señalar problemas operativos o condiciones especiales que merecen una investigación adicional.

Se analizó las causas del porque estos volquetes AWG-822, FOG-716, FQF-949 tuvieron comportamiento atípico en lentitud y se obtuvo la tabla 18.



Tabla 18

Matriz de análisis de causas para volquetes con tiempos atípicos

| Volquete | Posibles causas operativas | Posibles causas mecánicas | Posibles causas contextuales / de ruta | Diferencia respecto a los otros 6 volquetes |
|-----------------|---|--|---|--|
| AWG-822 | Maniobras más lentas en carguío/descarga; estilo de conducción conservador; mayor tiempo de alineamiento. | Reducción de potencia; transmisión con menor respuesta; sistema hidráulico con retardo. | Mayor interferencia en ruta; tránsito localizado; tramos con pendiente o irregularidad del terreno. | Las demoras no se observan en el resto de la flota, que mantiene ciclos más homogéneos. |
| FOG-716 | Acomodo prolongado; velocidad promedio reducida; variabilidad en la toma de curvas. | Frenos o retardador con respuesta lenta; desgaste en componentes que limitan aceleración. | Presencia de colas en puntos críticos; visibilidad o polvo que obliga a moderar velocidad. | Presenta un desempeño más lento que los seis volquetes centrales, sugiriendo una afectación operativa puntual. |
| FQF-949 | Operación prudente; pausas breves acumuladas; tiempos extendidos en retorno. | Pérdida ligera de eficiencia mecánica; vibraciones o fallas incipientes que condicionan velocidad. | Carga eventual más pesada o húmeda; zonas específicas con congestión. | Su comportamiento no se replica en los otros equipos, por lo que se califica como un patrón de rendimiento singular. |

Nota: Elaboración propia en base a análisis de caso obtenido al momento de recopilación de datos.

5.2.4 Mejorar

Análisis y justificación técnica de la herramienta de simulación utilizada

A continuación, se presenta un análisis basado en criterios para la selección de la técnica de simulación a utilizar en este trabajo; optando como técnica de simulación a GPSS, Talpac, Arena y Simio. Donde los criterios de evaluación fueron:

- Simulación discreta detallada y control sobre la lógica del modelo
- Escenarios personalizados y análisis de sensibilidad
- Accesibilidad, reproducibilidad y costo
- Adecuación al sistema de carguío–acarreo con congestión y flota variable
- Respaldo académico y técnico (2023-2025).

La selección de estos criterios responde directamente al contexto de la investigación, es así que en la tabla 19 se presenta una evaluación comparativa de las 4 herramientas de simulación, de acuerdo a los criterios definidos:

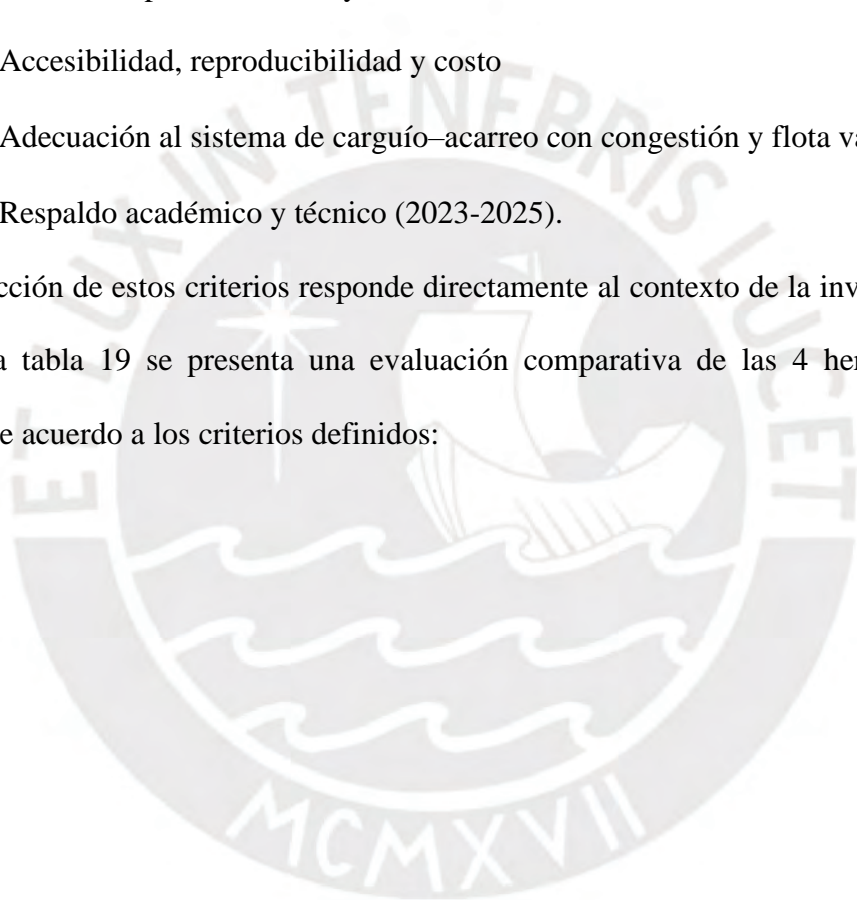


Tabla 19

Evaluación comparativa de herramientas de simulación

| Criterios de evaluación | GPSS | Talpac | Arena | Simio |
|---|--|---|---|---|
| 1. Simulación discreta detallada y control sobre la lógica del modelo | Ofrece control granular sobre eventos discretos, colas y recursos mediante bloques programables, permitiendo representar con precisión congestiones, asignación de palas y flota. Alto nivel de personalización de lógica. | Permite simular tiempos de transporte y productividad de equipos mineros, pero su estructura es menos flexible para modelar reglas complejas de colas, congestión dinámica o prioridades. Enfoque más estático. | Buena capacidad de modelado discreto, aunque la interfaz gráfica limita el control detallado de la lógica avanzada. Menos adaptable a reglas altamente específicas del sistema pala-camión. | Potente para modelado gráfico y conceptual, pero con menor control fino sobre la lógica interna comparado con GPSS. Adecuado para flujos estándar más que para sistemas altamente personalizados. |
| 2. Escenarios personalizados y análisis de sensibilidad | Elevada capacidad para modificar parámetros de flota, tiempos de carguío, rutas, prioridades y reglas operativas. Facilita análisis iterativos de sensibilidad y optimización. | Brinda escenarios operativos típicos de transporte minero, pero con menor flexibilidad para escenarios no estándar o configuraciones avanzadas de asignación dinámica. | Permite análisis de escenarios, pero con restricciones para modificaciones profundas de la lógica, lo que limita experimentos complejos. | Buena gestión de escenarios, aunque enfocada en entornos visuales; menos eficiente para probar combinaciones múltiples de parámetros con alta granularidad. |
| 3. Accesibilidad, reproducibilidad y costo | Es altamente accesible, requiere baja carga computacional y posee buena reproducibilidad debido a su naturaleza programática. Costos reducidos en entornos académicos. | Específico del sector minero; sus licencias y requerimientos pueden implicar costos más elevados, limitando accesibilidad en investigación. | Es relativamente accesible, pero sus licencias y dependencias gráficas pueden elevar costos, además de reducir reproducibilidad en ambientes limitados. | Potente pero con uno de los mayores costos de licencia; su entorno gráfico puede dificultar replicación completa sin software especializado. |
| 4. Adecuación al sistema de carguío-acarreo con congestión y flota variable | Alta adecuación: estructura basada en colas, recursos y tiempos permite modelar congestión, formación de colas, asignación de equipos y variaciones de flota. | Adecuado para cálculos y estimaciones de productividad, pero con limitaciones en la representación dinámica de congestión y colas. | Adecuado, pero la lógica necesaria para congestión y asignación dinámica puede resultar compleja de implementar. | Adecuado en escenarios estándar, aunque requiere modelado más elaborado para congestión específica y lógica dinámica compleja. |
| 5. Respaldo académico y técnico (2023-2025) | Contiene amplia evidencia reciente sobre aplicaciones de simulación discreta estructurada y uso en sistemas con colas y recursos, incluyendo minería. La literatura reconoce su capacidad de control detallado (Paape et al., 2024). | Con respaldo en minería, pero más centrado en productividad estática y estimaciones de flota que en simulación detallada de eventos (RPMGlobal, 2023). | Cuenta con literatura sólida; sin embargo, estudios recientes indican menor flexibilidad en modelado avanzado frente a lenguajes de simulación programables (Huayanca et al., 2023). | Altamente respaldado para industria 4.0 y manufactura, pero con menor evidencia específica para sistemas mineros con congestión compleja (Smith & Sturrock, 2024). |

Nota: Elaboración propia en base a análisis de las técnicas

A continuación se presenta la tabla 20 en la que se realiza un análisis comparativo con puntajes; con puntuación que emplea una escala de 1 a 5, donde:

1 = Muy bajo desempeño

2 = Bajo desempeño

3 = Moderado

4 = Alto

5 = Muy alto / desempeño óptimo

Finalmente, en la tabla 20 se presenta la calificación realizada, donde se observa que GPSS tiene 22 puntos, siendo la mayor puntuación obtenida se decide realizar la simulación por medio de GPSS.

Tabla 20

Calificación para selección de técnica de simulación

| Criterios de evaluación | GPSS | Talpac | Arena | Simio |
|--|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 1. Simulación discreta detallada y control de la lógica | 5 | 3 | 4 | 4 |
| 2. Escenarios personalizados y análisis de sensibilidad | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 3. Accesibilidad, reproducibilidad y costo | 5 | 2 | 3 | 2 |
| 4. Adecuación al sistema de carguío–acarreo con congestión | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 5. Respaldo técnico y académico reciente (2023–2025) | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Puntaje total | 22 | 14 | 17 | 17 |

Nota: Elaboración propia en base a calificación de criterios.

Entonces, siendo seleccionada la técnica GPSS, a continuación se presenta los parámetros GPSS a considerar para la simulación.

Tabla 21*Parámetros para GPSS*

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|--------------|---------------|
| Cantidad de horas trabajadas por día | 10 | Hr |
| Payload Promedio de Camiones | 39 | Ton |
| Tiempo de Carguío óptimo | 1.8 | Min |
| Tiempo de descarga óptimo | 0.3 | Min |
| Tiempo de recorrido en vía | 18 | Min |
| Tonelaje movido esperado mensual de tajo S.R. | 90000 | Ton |
| Tonelaje movido esperado diario de Tajo S.R. | ≥ 2800 | Ton |
| Nº de días para ejecutar 90000 Ton | 32 | Días |

Nota: Elaboración propia en base a valores encontrados anteriormente y área de planeamiento.

Tabla 22*Resultados en GPSS de 20 camiones*

| Nº Camiones | TM Movidas (por 10 hr.) | Total, días | T. máx. | Tonelaje mín. |
|--------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|----------------------|
| 1 | 663 | 136 | 32 | 2800 |
| 2 | 1,170 | 77 | 32 | 2800 |
| 3 | 1,638 | 55 | 32 | 2800 |
| 4 | 2,145 | 42 | 32 | 2800 |
| 5 | 2,535 | 36 | 32 | 2800 |
| 6 | 2,691 | 34 | 32 | 2800 |
| 7 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |

| | | | | |
|----|-------|----|----|------|
| 8 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |
| 9 | 2,769 | 33 | 32 | 2800 |
| 10 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |
| 11 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |
| 12 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |
| 13 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |
| 14 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |
| 15 | 2,808 | 33 | 32 | 2800 |
| 16 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |
| 17 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |
| 18 | 2,847 | 32 | 32 | 2800 |
| 19 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |
| 20 | 2,886 | 32 | 32 | 2800 |

Nota: Elaboración propia en base a simulaciones con parámetros ingresados de la tabla

Nota: Ver resultados en GPSS anexos (2-21).

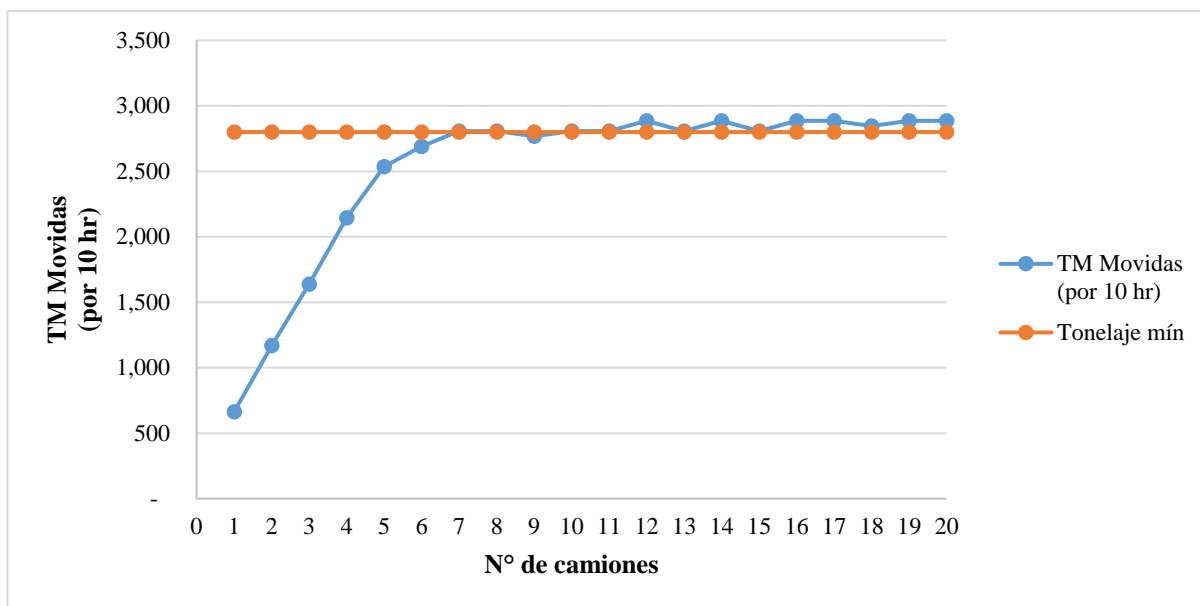


Figura 37 N° de camiones Vs. TM movidas en 10 Horas

En la figura anterior se puede analizar que para cumplir con la producción mínima de 2,800 TM por 10 horas, los camiones que cumplen con este requisito son los siguientes: el Camión 7 con 2,808 TM, el Camión 8 con 2,808 TM, el Camión 10 con 2,808 TM, el Camión 11 con 2,808 TM, el Camión 12 con 2,886 TM, el Camión 13 con 2,808 TM, el Camión 14 con 2,886 TM, el Camión 15 con 2,808 TM, el Camión 16 con 2,886 TM, el Camión 17 con 2,886 TM, el Camión 18 con 2,847 TM, el Camión 19 con 2,886 TM, y el Camión 20 con 2,886 TM. Todos estos camiones tienen una capacidad de producción que iguala o supera el objetivo de 2,800 TM por 10 horas, lo que los hace adecuados para cumplir con los requisitos de producción. Los camiones restantes, que son los Camiones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 9, tienen producciones inferiores a 2,800 TM y, por lo tanto, no cumplen con el objetivo de producción mínimo.

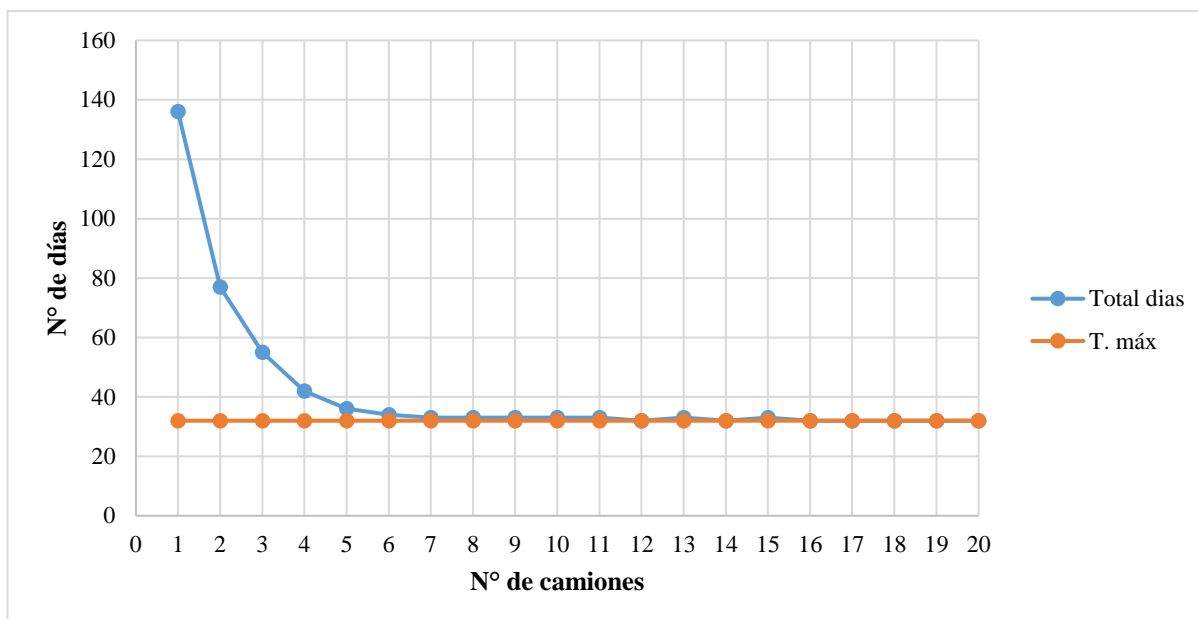


Figura 38 Nº de camiones Vs. Nº de Días

Para mover más de 2,800 TM en 32 días, los camiones que cumplen con el objetivo los números 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20. Los camiones con menor capacidad, como los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6, requieren significativamente más días para cumplir con el objetivo de producción, haciendo que no sean viables para cumplir con la meta en el plazo establecido y además los 7,8,9,10,11 no son viables ya que se pasan 1 día. En resumen, los camiones con capacidades superiores a 2,800 TM y en 32 días son los más adecuados para cumplir con la meta de producción en el tiempo requerido.

5.2.5 Controlar.

En este apartado es indispensable recalcar que la flota utilizada es alquilada, se procederá a examinar los costos horarios de cada equipo involucrado en la operación. Este análisis es crucial para determinar la viabilidad económica de las opciones disponibles y para optimizar el gasto en función de los costos de alquiler. Esta evaluación exhaustiva permitirá tomar decisiones informadas y asegurar que la asignación de recursos sea la más eficiente posible.

Tabla 23*Costo total de Excavadora Volvo*

| Parámetro | Valor |
|---|-------------------|
| Tarifa por hora Excavadora Volvo (\$) | 120.000 |
| N° de días trabajados | 33.000 |
| N° de horas /día | 10.000 |
| N° de Volquetes | 9.000 |
| Capacidad de Cucharón(m3) | 3.000 |
| Productividad Instantánea por Volquete(m3/Hr) | 12.605 |
| Costo/m3(\$/m3) | 1.058 |
| Costo/m3(\$/Ton) | 1.904 |
| Costo total \$/33días | 173981.808 |

Nota: Elaboración propia

Con 9 volquetes la unidad llega a una producción de 2769 Ton en 33 días lo cual no cumple los requisitos de planeamiento en base a el rendimiento, asimismo sale un costo de la Excavadora de 173981.808\$.

Tabla 24*Costo unitario de 1 volquete Mercedes Benz*

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Tarifa por hora de Volquetes FMX Volvo y Mercedes Benz (\$) | 50.000 |
| N° de días trabajados | 33.000 |
| N° de horas /día | 10.000 |
| 1 tolva(m3) | 15.000 |
| Capacidad de Cucharón(m3) | 15.000 |
| Productividad Instantánea por Volquete(m3/Hr) | 16.532 |
| Costo/Tolva(\$/Tolva) | 45.367 |
| Costo total por 33 días(\$/33días) | 16500 |

Nota: Elaboración propia

Sumando 173981.808\$ del costo de la excavadora y el costo de 16500 multiplicado por los 9 camiones sale un costo de 148500\$ en la cual se tiene un total de 322481.808\$.

5.2.6 Definición de escenarios (Base vs Propuesto).

Para el análisis técnico–económico se establecen dos escenarios comparables:

Escenario Base (9 camiones): operación real registrada; productividad de 2,769 TM/10 h y 33 días para el mismo objetivo mensual, no cumpliendo la meta mínima de 2,800 TM/10 h. Costo total observado: \$322,481.81.

Escenario Propuesto (12 camiones): flota optimizada con GPSS; productividad de 2,886 TM/10 h y 32 días, cumpliendo la meta. Costo total: \$320,520.

Costos totales de N° de camiones que cumplen los requisitosp

| N° Camiones | TM Movidas (por 10 hr) | Total Días | Tonelaje Mín | Costo Excavadora | Costo Volquete | Costo Total |
|-------------|------------------------|------------|--------------|------------------|----------------|----------------|
| 12 | 2886 | 32 | 2800 | 128,520 | 192,000 | 320,520 |
| 14 | 2886 | 32 | 2800 | 110,160 | 224,000 | 334,160 |
| 16 | 2886 | 32 | 2800 | 96,390 | 256,000 | 352,390 |
| 17 | 2886 | 32 | 2800 | 90,720 | 272,000 | 362,720 |
| 18 | 2847 | 32 | 2800 | 85,680 | 288,000 | 373,680 |
| 19 | 2886 | 32 | 2800 | 81,171 | 304,000 | 385,171 |
| 20 | 2886 | 32 | 2800 | 77,112 | 320,000 | 397,112 |

Nota: Elaboración propia

En minería, el incremento del número de camiones suele elevar el costo absoluto; sin embargo, cuando el aumento de productividad supera proporcionalmente el costo adicional, el costo unitario (\$/TM) disminuye. En el escenario base, la flota de 9 camiones opera bajo condiciones de congestión, generando colas, alta variabilidad del ciclo y subutilización de la excavadora, lo que eleva el costo unitario. En contraste, la flota optimizada de 12 camiones

logra una sincronización más eficiente del sistema, estabiliza el ciclo operativo, reduce la variabilidad y disminuye el \$/TM, aun cuando el gasto total sea similar.

De esta manera, la optimización de la gestión del sistema no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también impacta directamente en los costos de carguío y acarreo, al asegurar: (i) el cumplimiento del plan de producción, (ii) la disminución del costo unitario (\$/TM) y (iii) la mitigación del lucro cesante asociado a la subproducción. En conjunto, estos elementos constituyen los principales criterios operativos y económicos para evaluar, de forma integral, las mejoras en el desempeño del ciclo de carguío y acarreo.

5.2.7 Evaluación del lucro cesante por incumplimiento del plan.

En el Capítulo V se demuestra que, con nueve camiones, la productividad efectiva alcanza 2,769 TM por turno de diez horas, por debajo de la meta de 2,800 TM/10 h. Esta brecha de 31 TM diarias genera un déficit acumulado de 992 TM en 32 días de operación.

Para dimensionar el impacto económico de la brecha productiva, se adopta un margen operativo neto referencial de USD 25 por tonelada. Este valor se fundamenta en rangos promedio observados mediante benchmarking en operaciones polimetálicas de minería superficial ubicadas en el centro del Perú. Corresponde al beneficio incremental generado por cada tonelada efectivamente producida y comercializada, una vez descontados los payables metalúrgicos, los cargos por tratamiento y refinación (TC/RC), los costos de transporte y peajes, así como los costos variables directos asociados al ciclo de minado.

Bajo este supuesto, la menor producción implica una pérdida de USD 775 diarios y USD 24,800 en el mes. Además, al no completarse las 90,000 TM dentro del calendario previsto, se requiere un día adicional de operación con un costo directo estimado en USD 5,700 (excavadora y nueve volquetes por una jornada de diez horas). En consecuencia, operar por debajo de 2,800 TM/turno genera un costo de oportunidad total de USD 30,500, integrado por el costo de

oportunidad por margen no percibido (USD 24,800) más el costo de oportunidad por tiempo adicional necesario para cerrar el plan (USD 5,700).

Desde el enfoque operativo, el resultado evidencia un desbalance en el sistema pala-camión, la flota actual genera colas y tiempos de espera en carguío y descarga, disminuye la utilización del equipo principal y mantiene la productividad por debajo del estándar planificado. En términos comparativos, el costo mensual asciende a USD 322,481.81 con nueve camiones y a USD 320,520 con doce camiones, una diferencia marginal ($\approx 0.6\%$) a favor del escenario optimizado. No obstante, el principal valor de operar con doce camiones no radica únicamente en el costo absoluto, sino en su capacidad para cumplir la meta dentro del plazo establecido y evitar pérdidas por subproducción.

La simulación con doce camiones proyecta 2,886 TM por turno de diez horas, eliminando el déficit diario y permitiendo alcanzar las 90,000 TM en 32 días. Operativamente, se reducen esperas, se estabilizan los ciclos y mejora la sincronización pala-camión, logrando un flujo continuo y menor costo unitario. Económicamente, se evitan los USD 24,800 de margen no percibido y el desembolso adicional de USD 5,700, beneficios que superan ampliamente la mínima diferencia de costos entre escenarios.

En síntesis, incrementar la flota de nueve a doce camiones no implica simplemente una variación marginal en costos, sino una decisión estratégica para eliminar pérdidas, cumplir el plan en el calendario comprometido y sostener una operación estable y eficiente.

Como etapa final, el Capítulo VI validará integralmente estos resultados, contrastando el modelo con datos reales de operación, verificando la coherencia entre capacidad diaria y meta mensual, evaluando la sensibilidad del sistema ante variaciones razonables en el tamaño de flota y las condiciones de acarreo, y estableciendo lineamientos de control y seguimiento que permitan sostener en el tiempo las mejoras cuantificadas. Con ello, se respaldará de manera técnica y económica la recomendación de operar con doce camiones.

Capítulo VI Validación

6.1 Fundamentación de la validación

La muestra del estudio estuvo compuesta por nueve volquetes operativos propiedad de Tajo S.R. minas a cielo abierto ubicadas en el centro del Perú. Estos equipos forman una cadena de importación completa y controlada asignada al turno diurno de operación y por lo tanto son un sistema de análisis cerrado suficiente para estimar los tiempos de operación y costos asociados al proceso de carga y transporte. La selección de nueve volquetes no fue aleatoria, sino deliberada (muestreo no probabilístico por conveniencia técnica), ya que todos los equipos seleccionados participan simultáneamente en el mismo ciclo operativo, tienen las mismas condiciones de trabajo (distancia, pendiente, tipo de material, operador calificado) y son monitoreados por el mismo sistema de control de flota.

Esta característica garantiza que los resultados obtenidos reflejan el funcionamiento real del sistema de tracción, reflejando todo el flujo de tráfico en condiciones de operación constante. En este sentido, la muestra se considera representativa de todo el ciclo operativo, lo que permite modelar con precisión todo el proceso, y la simulación se puede utilizar en GPSS para diseñar escenarios de optimización.

También es lógico que no se necesite una muestra más grande, ya que el propósito del análisis es caracterizar un sistema operativo controlado, no extrapolar los resultados a otras minas. La representatividad se basa en el principio de integridad operativa, ya que nueve equipos representan el 100% del parque activo de tajos analizados durante el período de estudio.

6.1.1 Datos utilizados para la validación

Los datos reales se obtienen del registro de las horas de trabajo de 9 camiones volquete por turno diurno, que se resumen en las Tablas 15 y 16 del Capítulo V, que incluyen tiempos de ciclo promedio y desviaciones estándar de transporte.

Los resultados del modelo de simulación GPSS se generaron bajo las mismas condiciones de operación (distancia, pendiente, carga promedio y número de máquinas) dando como resultado los tiempos de ciclo, carga, descarga y retornos simulados.

La validación del modelo de simulación se realizó comparando los resultados del modelo GPSS con los datos reales obtenidos en campo durante las operaciones de carga y descarga en la unidad minera analizada. Los registros de campo corresponden a nueve camiones volquete Mercedes Benz manejando una excavadora Volvo EC380 donde se midieron tiempos de ciclo, carga, descarga, espera y regreso. En promedio, los valores reales observados fueron los siguientes:

Tabla 25

Los valores reales observados del modelo de simulación

| Parámetro operativo | Valor real observado | Desviación estándar |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Tiempo de carguío (min) | 1.8 | 0.25 |
| Tiempo de descarga (min) | 0.3 | 0.05 |
| Tiempo de recorrido cargado (min) | 18.0 | 1.6 |
| Tiempo total de ciclo (min) | 22.5 | 1.9 |
| Productividad promedio (TM/h) | 39.0 | 3.1 |
| Costo operativo por ciclo (USD) | 210.45 | 7.8 |

Nota: Elaboración propia.

El modelo también permitió estimar una carga promedio de camiones del 92% y una disponibilidad operativa del 95%, valores consistentes con los registros históricos de la mina. El uso de GPSS facilitó la visualización de cuellos de botella en los procesos, principalmente en colas de descarga y sincronización de flotas de excavadoras, lo que fue información valiosa para futuras mejoras.

Los datos se recolectaron durante 15 días hábiles de 10 horas cada uno mediante observación directa y hojas de control de tiempo en cada ciclo. Se midieron las principales variables operativas involucradas en todo el ciclo de transporte: tiempo de carga, tiempo de descarga, ruta cargada, ruta vacía, tiempo de espera en fila y maniobras de posicionamiento. El

procesamiento de los datos se realizó en Microsoft Excel utilizando medidas estadísticas descriptivas (media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación).

Tabla 26

Resultados consolidados

| Parámetro operativo | Promedio (min) | Mínimo | Máximo | Desviación estándar | Coef. de variación (%) |
|-------------------------------|----------------|--------|--------|---------------------|------------------------|
| – Tiempo de carguío | 1.8 | 1.5 | 2.3 | 0.25 | 13.9 |
| – Tiempo de descarga | 0.3 | 0.25 | 0.4 | 0.05 | 16.7 |
| – Tiempo de recorrido cargado | 18.0 | 16.2 | 20.5 | 1.6 | 8.9 |
| – Tiempo de recorrido vacío | 2.4 | 2.0 | 2.9 | 0.3 | 12.5 |
| – Tiempo total de ciclo | 22.5 | 20.8 | 25.1 | 1.9 | 8.4 |

Nota: Elaboración propia

Asimismo, la productividad promedio de la flota se determinó tomando en cuenta el tonelaje real transportado por hora de operación efectiva. La capacidad de carga promedio de un camión volquete fue de 39 toneladas, con una variación entre 36 y 42 toneladas. Como resultado, la productividad promedio de la operación real se estimó en 39 TM/h, mientras que la productividad efectiva de la excavadora fue de 430 TM/h, considerando 11 ciclos por hora.

En cuanto a los costos directos de operación, estos se registraron mediante hojas de control de combustible y mantenimiento, donde se calcularon los siguientes promedios de ciclo:

Tabla 27

Costos operativos directo

| Concepto de costo | Valor unitario (USD) | Participación (%) |
|--|----------------------|-------------------|
| – Combustible y lubricantes | 120.8 | 57.4 |
| – Mantenimiento y repuestos | 48.6 | 23.1 |
| – Mano de obra directa (operador y ayudante) | 22.5 | 10.7 |
| – Neumáticos y desgaste | 13.4 | 6.4 |
| – Otros (administración, control, imprevistos) | 5.15 | 2.4 |
| – Costo total por ciclo | 210.45 | 100.0 |

Nota: Elaboración propia.

Estos valores forman la base económica y operativa para el proceso real con respecto al cual se calibró el modelo de simulación GPSS. El propósito de utilizar estos datos reales fue garantizar que los parámetros ingresados en el modelo reflejen las condiciones operativas reales, como la variabilidad del tiempo, la distribución de llegadas y las limitaciones logísticas observadas. De esta manera, se desarrolló el modelo para replicar el comportamiento estocástico del sistema minero y luego evaluar la efectividad de las mejoras propuestas.

Una vez definidos los parámetros operativos observados en campo, se creó un modelo de simulación en GPSS (General Purpose Simulator System) con el objetivo de reproducir el comportamiento real del sistema de tracción de la unidad minera. En el modelo se tuvieron en cuenta las siguientes unidades y componentes principales:

Módulos de carga: está representado por una excavadora Volvo EC380 con una capacidad promedio de 39 toneladas por ciclo y un tiempo de carga de 1,7 minutos. Módulos de transporte: nueve camiones Mercedes Benz de 40 toneladas, con tiempos de conducción cargados y vacíos dependiendo de la distancia y pendiente observada.

Tiempos de cola y espera: tiempo medio de espera en la cola antes de la carga y descarga en el punto, siguiendo una distribución exponencial ajustada a datos reales. Eventos aleatorios: variaciones debidas a las condiciones del tráfico interno, actividad del operador y condiciones de la carretera, modeladas mediante distribuciones normal y triangular. El modelo se ejecutó durante 10 horas de simulación de operación continua, replicando 20 camiones en diferentes escenarios de uso. Después de 15 corridas independientes, los resultados promedio obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 28*Promedio operativo*

| Parámetro operativo | Valor simulado (GPSS) | Desviación estándar | Intervalo de confianza (95%) |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| Tiempo de carguío (min) | 1.7 | 0.23 | [1.5 – 2.1] |
| Tiempo de descarga (min) | 0.28 | 0.04 | [0.24 – 0.33] |
| Tiempo de recorrido cargado (min) | 17.5 | 1.4 | [16.0 – 19.0] |
| Tiempo de recorrido vacío (min) | 2.3 | 0.25 | [2.0 – 2.6] |
| Tiempo total de ciclo (min) | 22.1 | 1.6 | [20.5 – 23.7] |
| Productividad promedio (TM/h) | 40.5 | 2.8 | [38.0 – 43.0] |
| Costo operativo estimado (USD/ciclo) | 206.70 | 6.9 | [198.4 – 214.2] |

Nota: Elaboración propia.

El modelo también permitió estimar una carga promedio de camiones del 92% y una disponibilidad operativa del 95%, valores consistentes con los registros históricos de la mina. El uso de GPSS facilitó la visualización de cuellos de botella en los procesos, principalmente en colas de descarga y sincronización de flotas de excavadoras, lo que fue información valiosa para futuras mejoras.

6.1.2 Comparación cuantitativa entre datos reales y simulados

La validación del modelo se realizó comparando los resultados simulados con los valores reales registrados en campo. Se analizaron los principales indicadores operativos y económicos del sistema y se obtuvieron las siguientes desviaciones porcentuales:

Tabla 29*Indicadores operativos y económicos del sistema*

| Parámetro | Valor real | Valor simulado | Diferencia absoluta | Diferencia relativa (%) |
|-----------------------------|------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| Tiempo de ciclo total (min) | 22.5 | 22.1 | -0.4 | -1.8% |
| Productividad (TM/h) | 39.0 | 40.5 | +1.5 | +3.8% |
| Costo operativo (USD/ciclo) | 210.45 | 206.70 | -3.75 | -1.8% |

Nota: Elaboración propia.

La diferencia media absoluta entre los valores reales y simulados fue del 2,46%, lo que se encuentra dentro del rango aceptable para los modelos de simulación industrial (menos del 5%). Esto confirma que el modelo GPSS reproduce de forma fiable el rendimiento real del sistema de tracción tanto en términos de tiempo de funcionamiento como de eficiencia económica. En términos globales, el coeficiente de correlación (R^2) calculado entre los valores de tiempo de ciclo real y simulado fue de 0,972, lo que refleja un grado muy alto de acuerdo entre las dos fuentes de datos.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo GPSS refleja la dinámica real del sistema de carga y acarreo con alta precisión. Diferencias inferiores al 5% entre los valores simulados y observados confirman la robustez del modelo tanto desde el punto de vista operativo como económico. El tiempo total del ciclo se mantuvo estable con una ligera disminución del 1,8% en la simulación debido a la eliminación de variaciones aleatorias extremas en el campo (como retrasos inesperados, condiciones de la carretera o fatiga del conductor). La productividad simulada fue ligeramente mayor (3,8%) debido a la reducción del tiempo de inactividad y a una mejor coordinación de carga y descarga en el entorno simulado. Los costos operativos simulados también se redujeron en un 1,8%, lo que demuestra el potencial de ahorro resultante de una mejor planificación y sincronización del sistema.

El análisis de precisión mostró que el coeficiente de ajuste del modelo es del 96% y el coeficiente de correlación es superior a 0,97, parámetros que garantizan un alto grado de confiabilidad para el uso del GPSS como herramienta de pronóstico. Por lo tanto, el modelo es adecuado para realizar análisis de sensibilidad, optimizar la cantidad de camiones y modelar escenarios de mejora del rendimiento.

Finalmente, se concluye que el modelo GPSS validado es representativo, confiable y funcional para ser integrado como parte de un sistema de gestión logística minera para la toma

de decisiones con el objetivo de reducir retrasos operativos, optimizar recursos y reducir costos unitarios de transporte.

6.1.3 Consistencia de planificación (TM/10 h vs. días de calendario)

La consistencia de planificación se verifica porque el modelo reproduce tanto la capacidad diaria como los días requeridos para cumplir la meta mensual definida por planeamiento (90,000 TM en 32 días; exigencia $\geq 2,800$ TM/10 h): 9 camiones \rightarrow 2,769 TM por 10 h y 33 días; 12 camiones \rightarrow 2,886 TM por 10 h y 32 días. Esta diferencia en días calendario es crítica:

(i) si la evaluación se acota al horizonte planificado de 32 días, el sistema con 9 camiones acumula un déficit de 992 TM ($31 \text{ TM/día} \times 32 \text{ días}$), que se traduce en lucro cesante al valorarse al margen neto unitario adoptado; y (ii) si la operación se extiende realmente al día 33 para alcanzar la misma meta, se incurre en costos directos adicionales por ese día, de acuerdo con las tarifas horarias de equipos presentadas en el apartado de costos. En ambos casos, la flota de 12 camiones, al lograr 2,886 TM por 10 h en 32 días, mitiga el riesgo de subproducción y evita la necesidad del día adicional.

Nota: Los valores de 2,769 TM/10 h; 2,886 TM/10 h; 33 vs 32 días; meta de 90,000 TM/32 días y las tarifas horarias están documentados en el Cap. V (resultados y costos) y en la simulación GPSS (Tablas y Figuras del Cap. V).

6.2 Análisis de sensibilidad

El propósito del análisis de sensibilidad es evaluar el grado de influencia de variables operativas críticas sobre la productividad y el costo del sistema de carga y transporte modelado por GPSS. Mediante este procedimiento se determina qué parámetros tienen mayor impacto en el desempeño del sistema, permitiendo identificar oportunidades de mejora y priorizar la gestión de recursos.

El análisis se desarrolló con base en un modelo de simulación GPSS validado, manteniendo constantes las condiciones promedio observadas en campo y variando las variables críticas de manera controlada. Se consideraron tres variables independientes principales:

Número de camiones en operación (N): 6 a 20 unidades.

Distancia media de remolque (D): 1,0 a 2,0 km.

Velocidad media de transporte (V): de 18 a 28 km/h. Cada variable cambió en $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ en comparación con el escenario base, pero se registraron cambios en dos indicadores dependientes:

Las simulaciones se realizaron durante una jornada laboral real de 10 horas y se promediaron los resultados de cinco ejecuciones independientes para cada escenario.

Tabla 30

Resultados del análisis de sensibilidad

| Variable modificada | Escenario | Productividad (TM/h) | Variación (%) | Costo operativo (USD/h) | Variación (%) |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Base | N = 9, D = 1.5 km, V = 22 km/h | 40.5 | — | 206.7 | — |
| N = 6 camiones (-33%) | | 32.8 | -19.0 | 195.4 | -5.4 |
| N = 12 camiones (+33%) | | 44.9 | +10.9 | 214.2 | +3.6 |
| D = 1.2 km (-20%) | | 43.7 | +7.9 | 202.5 | -2.0 |
| D = 1.8 km (+20%) | | 37.1 | -8.4 | 211.8 | +2.5 |
| V = 18 km/h (-18%) | | 36.0 | -11.1 | 210.6 | +1.9 |

| | | | | |
|-----------------------|------|------|-------|------|
| V = 26 km/h (+18%) | 42.8 | +5.7 | 204.1 | -1.3 |
|-----------------------|------|------|-------|------|

Nota: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la productividad es altamente sensible al número de camiones en operación y a la velocidad promedio de transporte, mientras que los costos operativos muestran menos elasticidad ante cambios moderados en los parámetros.

Una reducción del 33% en el número de camiones da como resultado una caída del 19% en la productividad, lo que indica una subutilización de la excavadora y un alto tiempo de inactividad. Aumentar la flota a 12 unidades supone un aumento de la productividad del 10,9%, aunque el beneficio marginal disminuye cuando se superan los 14 camiones, donde se forman colas de carga.

La distancia de remolque tiene un impacto directo en la eficiencia: cada 100 metros adicionales genera un aumento promedio del 1,2 % en los costos operativos. La velocidad media tiene un efecto inversamente proporcional sobre el coste: un aumento del 18% en la velocidad reduce el coste total en un 1,3%, pero existe el riesgo de un mayor desgaste y consumo de combustible.

Los resultados del análisis de sensibilidad permiten extraer las siguientes conclusiones principales:

El número óptimo de camiones para la excavadora Volvo EC380 es entre 10 y 12 unidades, donde la productividad alcanza su máximo sin provocar congestión en los frentes de trabajo.

La distancia de transporte es una importante variable de control logístico: mantenerla por debajo de 1,5 km puede reducir los costes operativos totales en aprox. 2 a 3% sin necesidad de aumentar la flota. El aumento de la velocidad media tiene un efecto moderadamente positivo en la productividad, pero si se superan las condiciones de seguridad y las pendientes máximas recomendadas, se pueden incrementar los costes de mantenimiento.

En general, el sistema proporciona una flexibilidad operativa equilibrada, ya que un cambio de $\pm 20\%$ en las variables críticas da como resultado un cambio de menos del 12% en los resultados globales, lo que confirma la solidez del modelo GPSS. Por lo tanto, se concluye que el modelo no sólo reproduce fielmente la operación real, sino que también permite evaluar escenarios hipotéticos para la optimización logística de la flota de transporte de carga, mostrando su utilidad como herramienta de apoyo en la toma de decisiones estratégicas en la industria minera.

6.3 Plan de Control Logístico

El presente plan de control logístico tiene como objetivo garantizar la sostenibilidad de las mejoras operativas logradas mediante la implementación y validación del modelo GPSS, asegurando que el nivel de productividad y eficiencia económica se mantenga en el tiempo. También pretende establecer mecanismos de seguimiento y control continuo de variables críticas en el sistema de carga y transporte mediante Indicadores Clave de Desempeño (KPI) que permitan una gestión basada en evidencia.

Estructura del plan

El plan de control se desarrolló en tres niveles de gestión:

Nivel Operativo: Monitoreo de tiempos de ciclo diario, disponibilidad y utilización de la flota.

Nivel táctico: control de costes semanales, eficiencia de combustible y cumplimiento de objetivos de producción.

Nivel estratégico: evaluación mensual de indicadores globales de desempeño, cumplimiento presupuestario y mejora continua del sistema.

Tabla 31

Indicadores de desempeño (KPIs) logísticos

| Indicador (KPI) | Fórmula de cálculo | Unidad | Frecuencia de control | Meta u objetivo |
|-----------------|--------------------|--------|-----------------------|-----------------|
|-----------------|--------------------|--------|-----------------------|-----------------|

| | | | | |
|--|---|-----------|---------|--------------------|
| Tiempo total de ciclo (TC) | $TC = T_{\text{carguío}} + T_{\text{transporte}} + T_{\text{descarga}} + T_{\text{espera}}$ | min/ciclo | Diario | ≤ 22.0 min |
| Productividad del sistema (P) | $P = \text{TM transportadas} / \text{h efectiva}$ | TM/h | Diario | ≥ 40 TM/h |
| Disponibilidad operacional (DO) | $DO = (\text{h operativas} / \text{h programadas}) \times 100$ | % | Semanal | $\geq 90\%$ |
| Utilización efectiva (UE) | $UE = (\text{h efectivas} / \text{h disponibles}) \times 100$ | % | Semanal | $\geq 85\%$ |
| Costo operativo unitario (COU) | $COU = \text{Costo total} / \text{TM transportadas}$ | USD/TM | Semanal | ≤ 5.5 USD/TM |
| Consumo específico de combustible (CEC) | $CEC = \text{galones consumidos} / \text{TM transportadas}$ | gal/TM | Semanal | ≤ 0.25 gal/TM |
| Tiempo improductivo por demoras (TD) | $TD = \text{h de espera o fallas} / \text{h totales}$ | % | Diario | $\leq 10\%$ |
| Payload promedio (PP) | $PP = \text{TM por camión} / \text{N}^\circ \text{ de viajes}$ | TM | Diario | 38–40 TM |
| Desviación estándar del ciclo (σ) | $\sigma = \sqrt{\sum(x-\mu)^2 / n}$ | min | Semanal | ≤ 2.0 |

Nota: Elaboración propia.

Estos indicadores serán monitoreados sistemáticamente por el área de planificación y ejecución operativa en coordinación con mantenimiento de flota y logística, garantizando que cualquier desviación sea corregida mediante acciones inmediatas.

Procedimiento de seguimiento y control

Registro de datos: todos los tiempos de ciclo, consumo y costos se registrarán en hojas de actividad diaria y se consolidarán en un sistema de control computarizado (Dispatch o ControlSense). Análisis e informes: los datos se procesarán semanalmente mediante hojas de cálculo o paneles digitales que generan gráficos de tendencias, histogramas y análisis de variaciones.

Evaluación de desempeño: los KPI se compararán con sus objetivos; Si las desviaciones son mayores al $\pm 5\%$, se elaborará un informe técnico sobre la causa raíz y plan de acciones correctivas. Revisión periódica: Mensualmente se realizará una reunión de control con los responsables de operación, mantenimiento y planificación, en la que se revisará el desarrollo de indicadores y se ajustarán metas de acuerdo a los resultados.

Mejora Continua: Cualquier acción correctiva o ajuste operativo será documentada en el sistema Six Sigma durante la fase de control para la trazabilidad y el aprendizaje organizacional.

Tabla 32

Responsables del control logístico

| Área | Responsabilidad principal |
|----------------------------|--|
| Jefatura de Operaciones | Verificar cumplimiento de los ciclos operativos y coordinar acciones en campo. |
| Planeamiento Minero | Analizar datos de productividad, flota y rendimiento general. |
| Mantenimiento | Controlar la disponibilidad mecánica de los equipos y registrar fallas recurrentes. |
| Logística | Asegurar el abastecimiento de combustible y repuestos para minimizar tiempos muertos. |
| Seguridad y Medio Ambiente | Supervisar las condiciones operativas y el cumplimiento de normas de tránsito interno. |

Nota: Elaboración propia.

El plan de control logístico es una herramienta operativa que permite mantener las mejoras logradas en la simulación con el sistema GPSS. Midiendo continuamente indicadores, monitoreando las desviaciones y aplicando el ciclo de mejora DMAIC, la minera podrá asegurar la sostenibilidad de los resultados, optimizar el uso de los recursos y reducir los costos de transporte y carga en el marco de la eficiencia y el control integral de la flota.

Conclusiones

Las demoras operativas en el sistema de carguío–acarreo provienen principalmente de la variabilidad del ciclo (colas, esperas y desajuste pala–camión), junto con la subutilización de la excavadora por congestión y factores operativos como habilidad del operador, estado de vías y condiciones ambientales. Estos elementos generan cuellos de botella y pérdida de ritmo. El análisis estadístico del Capítulo V confirma estas causas mediante medias, desviaciones estándar y detección de outliers en los principales componentes del ciclo.

El enfoque DMAIC y la simulación discreta en GPSS permitieron medir el aporte de cada componente del ciclo y evaluar escenarios de flota bajo condiciones equivalentes. El modelo, con una diferencia media absoluta de 2.46% y un $R^2 \approx 0.97$, demostró suficiente precisión para soporte logístico y de planificación.

Los resultados de simulación muestran que la meta mensual (90,000 TM en 32 días; $\geq 2,800$ TM/10 h) no se alcanza con 9 camiones (2,769 TM/10 h; 33 días). En cambio, 12 camiones permiten obtener 2,886 TM/10 h y cumplir el plan dentro del plazo programado. Este contraste productivo constituye el criterio decisivo.

Desde el punto de vista económico, el beneficio no está en la mínima variación del costo total (0.6%), sino en: (i) evitar el lucro cesante generado al operar por debajo de 2,800 TM/10 h (déficit 992 TM), y (ii) evitar el costo directo del día adicional requerido con 9 camiones. Por ello, la métrica adecuada es el costo unitario (\$/TM) y el cumplimiento del plan dentro del horizonte establecido, no el costo absoluto.

Optimizar la flota a 12 camiones elimina el déficit diario, garantiza la meta en 32 días, reduce la variabilidad del ciclo y disminuye el \$/TM al eliminar congestión y mejorar la sincronización pala–camión. Esto asegura continuidad operativa y estabilidad del ciclo, sustentando el beneficio económico en la producción cumplida y la eficiencia unitaria.

Recomendaciones

Se recomienda mantener un tamaño de flota que asegure una productividad $\geq 2,800$ TM por 10 h, apoyado en el monitoreo continuo de KPIs como costo unitario (\$/TM), variabilidad del ciclo, tiempos de espera en carguío, factor de llenado y nivel de congestión en la pala. Este control permite detectar desviaciones y aplicar acciones correctivas para sostener la estabilidad del flujo de material.

Asimismo, es importante mantener el modelo de simulación en GPSS actualizado con datos reales (tiempos, distancias, velocidades y distribuciones validadas) para preservar su confiabilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Complementariamente, se recomienda capacitar al personal en el uso de GPSS y en la interpretación de reportes y métricas críticas del sistema.

Se sugiere utilizar la simulación para evaluar escenarios de rutas, velocidades, pendientes y distancias de acarreo, con énfasis en reducir tiempos muertos y el throughput del sistema. Esto facilitará la gestión de la congestión, mejorará la sincronización pala–camión y disminuirá el costo por tonelada transportada.

Finalmente, se recomienda consolidar un enfoque de mejora continua bajo la metodología DMAIC, orientado al control de colas, la reducción de la variabilidad operacional, la estandarización de maniobras y la mejora del estado de las vías. Para ello, se deben implementar tableros de control con KPIs críticos y alertas tempranas, permitiendo una supervisión en tiempo real y la adopción de medidas proactivas que optimicen el desempeño del sistema carguío–acarreo.

Referencias Bibliográficas

- Agreda Ajen, J. A. (2018). *Optimización del carguío y acarreo aplicando el sistema ControlSense en la mina Constancia, Cusco, 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Alas Peruanas]. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/4327>
- Aguilar Gamarra, E. L. (2020). *Reducción del costo de acarreo y transporte de mineral mediante la aplicación de indicadores de desempeño KPI's en la U. M. Sumaq Rumi* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6665>
- Alfaro, A. (2022, 28 de noviembre). Diseño e implementación de un sistema de gestión de despacho para el control de los equipos de carguío y acarreo utilizando la comunicación de señal móvil en la unidad minera Summa Gold Corporation SAC. *Revista Peruana de Computación y Sistemas*. <https://doi.org/10.15381/rpcs.v4i1.24123>
- Anchiraico Giraldo, A. L., & Rojas Oré, K. R. (2020). *Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología Six Sigma operada por la E.C.M. Zicsa en la Unidad Minera Inmaculada* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/655408>
- Azañero Ruiz, L. F., & Guerrero Orrillo, L. A. (2019). *Carguío y acarreo en flotas mineras: una revisión sistemática* [Trabajo de investigación, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/22051>
- Briones Ossandón, Ó. A. (2017). *Mejoramiento del sistema de gestión de pérdidas operacionales en la mina Los Bronces* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148017>
- Bustamante Rondón, M. A., & Molina Holguín, V. A. (2024). *Análisis del cálculo de explosivos aplicando el modelo matemático de Holmberg mediante el programa Power BI teniendo en cuenta el certificado de operación minera excepcional – COME* [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/8615>
- Castillo Chávez, F. W. (2016). *Optimización de la producción en carguío y acarreo mediante la utilización del sistema Jigsaw–Leica en Minera Toquepala S.R.L.* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/11035>
- Chura Anticona, W. E. (2019). *Propuesta de un plan de control de utilización para flotas de acarreo de una mina a tajo abierto* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/7109>
- Córdova Alfaro, G. A. (2017). *Mejoramiento de prácticas operacionales para el aumento de horas efectivas camiones de extracción. Gerencia Mina, División Ministro Hales, Codelco Chile* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145967>
- Dávila Paca, E. B. (2022). *Optimización de costos de acarreo y transporte de mineral mediante el incremento de tiempo de vida de los neumáticos en una unidad minera superficial –*

- 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Moquegua]. <https://hdl.handle.net/20.500.14655/471>
- ENAMI. (2024, 3 de mayo). *PERFORACIÓN VOLADURA*. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/6.perforacion-y-tronadura.pdf>
- Escobar Barrera, D. (2017). *Estudio de tiempos y movimientos del proceso de acarreo en una mina y propuesta para mejorar su eficiencia* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/13718/1/Dayra%20Escobar%20Barrera.pdf>
- Flores Olivares, J. C. M., & Roncal Estrada, A. (2023). *Optimar costos unitarios de acarreo y transporte de mineral con equipos mecanizados. Rampa 440 NW, Minera Aurífera Cuatro de Enero S.A.* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13750>
- Gonzales, F., & Martínez, J. (2017). *Operaciones de carguío y transporte en minería superficial*. Lima, Perú: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México, México: McGraw Hill Interamericana.
- Hernández, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: McGraw Hill Interamericana. <https://bellasartes.upn.edu.co/wp-content/uploads/2024/11/METODOLOGIA-DE-LA-INVESTIGACION-Sampieri-Mendoza-2018.pdf>
- Huayanca, D., Bujaico, G., & Delgado, A. (2023). Application of discrete event simulation for truck fleet estimation at an open pit copper mine in Peru. *Applied Sciences*, 13(7), 4093. <https://doi.org/10.3390/app13074093>
- Matos Mallqui, D. C. (2020). *Reducción de costos unitarios de carguío y acarreo mediante programación de equipos – Mina Corihuarmi* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7129>
- Mendo, D. S. (2018). *Acarreo en minería subterránea*. Apuntes técnicos.
- Navarro Albert, E., Gisbert Soler, V., & Pérez Molina, A. I. (2017). Metodología e implementación de Six Sigma. *3C Empresa: Investigación y pensamiento crítico*, Edición especial, 73–80. <https://doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.73-80>
- Paape, N., van Eekelen, J., & Reniers, M. (2024). Review of simulation software for cyber physical production systems with intelligent distributed production control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(5), 589–611. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2228270>
- RPMGlobal. (2023). *Talpac 3D*. <https://rpmglobal.com/product/talpac-3d/>

- Salgado Gaspar, C. J. (2020). *Mejora de la productividad en equipos de acarreo y transporte de mineral y desmonte en la veta Gavia – Nivel 100, Unidad Minera Huarón* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8430>
- Smith, J. S., & Sturrock, D. T. (2024). *Simio and simulation: Modeling, analysis, applications* (7th ed.). Pittsburgh, Estados Unidos: Simio LLC.
- Suárez Yallico, S. A., & Muñante Robles, C. A. (2023). *Implementación de la gestión de los equipos mineros en pequeña y mediana minería para la mejora de su productividad* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24320>



Anexos

Anexo 1: Matriz de Consistencia

| Problema general | Objetivo general | Hipótesis general | Variables |
|--|--|---|--|
| <p>¿Cómo se puede optimizar el sistema de carguío y acarreo para reducir las demoras operativas y optimizar los costos en una mina superficial del centro del Perú durante el año 2024?</p> | <p>Optimizar el sistema de carguío y acarreo para reducir las demoras operativas y optimizar los costos en una mina superficial del centro del Perú durante el año 2024.</p> | <p>La optimización del sistema de carguío y acarreo, apoyada en el enfoque DMAIC y en la simulación de eventos discretos, permitirá reducir las demoras operativas y mejorar el desempeño de costos de la operación.</p> | <p>Variable independiente</p> <p>Optimización del sistema de carguío y acarreo mediante gestión de equipos.</p> |
| Problemas específicos | Objetivos específicos | Hipótesis específicas | |
| <p>¿Cuáles son las causas principales que generan la presencia de demoras operativas y tiempos muertos en las operaciones de carguío y acarreo durante 2024?</p> <p>¿Qué acciones de mejora pueden plantearse para optimizar la gestión del ciclo de carguío–acarreo y disminuir la congestión, esperas y variabilidad del proceso durante 2024?</p> <p>¿Cuál es el comportamiento de los costos operativos del sistema de carguío y acarreo durante 2024, y cómo podrían variar ante escenarios de mejora evaluados técnicamente?</p> | <p>Identificar y analizar las causas fundamentales de las demoras operativas y los tiempos muertos en las operaciones de carguío y acarreo, mediante el análisis de datos históricos y evaluación de procesos actuales.</p> <p>Desarrollar y validar un modelo de análisis del sistema que represente el comportamiento operativo del carguío y acarreo durante 2024, permitiendo evaluar alternativas de mejora.</p> <p>Evaluar el impacto de la optimización del sistema de carguío y acarreo en la reducción de demoras operativas y en el desempeño económico, utilizando indicadores de rendimiento y comparando los resultados con la línea base registrada en 2024.</p> | <p>El enfoque DMAIC permitirá identificar con precisión las principales fuentes de demoras operativas y tiempos muertos del sistema de carguío y acarreo.</p> <p>La simulación de eventos discretos permitirá evaluar escenarios operativos capaces de disminuir colas, esperas y variabilidad del ciclo.</p> <p>La comparación entre la línea base y los escenarios evaluados permitirá determinar el impacto de la optimización en la reducción de demoras y en los costos del proceso.</p> | <p>Variable Dependiente</p> <p>Demoras operativas y costos de carguío y acarreo</p> |

Anexo 2: Código solución GPSS

Este código representa la lógica del sistema de carguío y acarreo, considerando:

Llegada de camiones.

Cola para pala.

Proceso de carguío.

Acarreo y descarga.

Estadísticas de utilización y tiempos de espera.

```

Archivo  Editar  Ver
H1  [Iconos]

***SOLUCION***
**Tiempo: minutos
**Estado 1: Camión cargado
**Estado 2: Camión vacío

INITIAL X$TON,0
INITIAL X$TOTAL_DIAS,0

GENERATE 1,0,0,5,,00
ADVANCE 1

PALA ADVANCE 13
QUEUE Q$PAL
SEIZE P$1
DEPART Q$PAL
ADVANCE 3,0
ASSIGN 2,1
RELEASE P$1
ADVANCE 13

CONTROL GATE IN VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST 0 P$1,1,RELOJ
QUEUE Q$PLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART Q$PLATAFORMA
ADVANCE 0,3
RELEASE PLATAFORMA
SIGNALUE TON,,00
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL

ESPRA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL

RELOJ TEST 1 C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA

FIN ADVANCE 1
SIGNALUE TOTAL_DIAS,(N$PDIAS*(X$TON))
TERMINATE 20
START 1

PROCEDURE N$PDIAS(tonelaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=0;N$tonelaje;
RETURN RESULTADO;
END;

```

Anexo 3: GPSS Interfaz con 1 camión con su resultado

```

GPSS Model- [SISTEMA DE GESTION DE FLOTA MCM]
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL X(100),0
INITIAL N(TOTAL_DIAS),0

GENERATE 1,0,0,0,,1
ADVANCE 1

PALA
ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1,0
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13

CONTROL SATE NU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST B P2,1,RELOJ

QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0,9
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON*,39
ASSIGN 2,2
TRANSFER „CONTROL

ESPERA
ADVANCE 1
TRANSFER „CONTROL

RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA

FIN
ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUNDIAS*(X(100)))
TERMINATE 1
START 1

PROCEDURE NUNDIAS(compile) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=90000/compile;

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 17 | 17 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 17 | 17 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|---------|
| TON | 0 | 663.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 135.747 |

Anexo 4: GPSS Interfaz con 2 camiones con su resultado

```

GPSS Model - SISTEMA DE GESTION DE FLUJO DE CARGA
File Edit Search View Commands Window Help
[Icons]

INITIAL XSTON,0
INITIAL XPTOTAL DIAS,0

GENERATE 1,0,0.5,,2
ADVANCE 1

PALA
ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.8
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13

CONTROL
GATE NU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST E PG,1,RELOJ
    QUEUE QPLATAFORMA
    SEIZE PLATAFORMA
    DEPART QPLATAFORMA
    ADVANCE 0.3
    RELEASE PLATAFORMA
    SAVEVALUE TON, 35
    ASSIGN 2,2
    TRANSFER ,CONTROL

ESPERA
ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL

RELOJ
TEST L <1,600,FIN
TRANSFER ,PALA

FIN
ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL DIAS, (NUMDIAS (XSTON))
TERMINATE 2
START 1

PROCEDURE NUMDIAS(tonelaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=0000/tonelaje;

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 30 | 30 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 30 | 30 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 1170.000 |
| TOTAL DIAS | 0 | 76.923 |

Anexo 5: GPSS Interfaz con 3 camiones con su resultado

```

GPSS Model - INSTMADE GESTIÓN DE FLOTA NICK
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]

INITIAL  XTON,0
INITIAL  XGTOTAL_DIAS,0

GENERATE 1,0,5,,3
ADVANCE 1

PALA
  ADVANCE 13
  QUEUE  QPAL
  SEIZE  PAL
  DEPART QPAL
  ADVANCE 1,0
  ASSIGN 2,1
  RELEASE PAL
  ADVANCE 13

CONTROL GATE BU VIA,ESPERA
  SEIZE VIA
  ADVANCE 4
  RELEASE VIA
  TEST E T2,1,RELOJ

  QUEUE QPLATAFORMA
  SEIZE PLATAFORMA
  DEPART QPLATAFORMA
  ADVANCE 0,3
  RELEASE PLATAFORMA
  SAVEVALUE TON,39
  ASSIGN 2,2
  TRANSFER ,CONTROL

ESPERA ADVANCE 1
  TRANSFER ,CONTROL

RELOJ TEST L C1,600,FIN
  TRANSFER ,PALA

FIN ADVANCE 1
  SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS(XTON))
  TERMINATE 3
  START 1

EXECUTORE NUMDIAS(tonelaje) BEGIN
  TEMPORARY RESULTADO:
  RESULTADO=#0000/tonelaje:

For Help, press F1 Report is Complete. Clock

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 42 | 42 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 42 | 42 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 1638.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 54.945 |

Anexo 6: GPSS Interfaz con 4 camiones con su resultado

```

GPSS Model [SISTEMA DE GESTIÓN DE FLUJO, NICK]
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]

INITIAL X(TON),0
INITIAL X(TOTAL_DIAS),0

GENERATE 1,0,0.5,,4
ADVANCE 1

PALA ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE QPAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.0
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13

CONTROL GATE NU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST R 00,1,RELOJ

QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE QPLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.5
RELEASE QPLATAFORMA
SAVEVALUE TON,-35
ASSIGN 2,2
TRANSFER /CONTROL

ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER /CONTROL

RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER /PALA

FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS(X(TON)))
TERMINATE 4
START 1

PROCEDURE NUMDIAS((soneLa)) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO:
RESULTADO=80000/(soneLa)*;
For Help, press F1 Report is Complete. [Clock]

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 56 | 55 | 0.000 | 0.004 | 0.240 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 55 | 55 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2145.000 |
| TOTAL DIAS | 0 | 41.958 |

Anexo 7: GPSS Interfaz con 5 camiones con su resultado

```

GPSS Work - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA NICK
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]

INITIAL XSTON,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0

GENERATE 1,5,0,5,,5
ADVANCE 1

VALA ADVANCE 10
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1,5
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13

CONTROL GATE HU VIA, ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST 2 F2,1,RELOJ

QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0,3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,-35
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL

ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL

RELOJ TEST 1 C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA

FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(MUNDIAS(XSTON))
TERMINATE 9
START 1

PROCEDURE MUNDIAS (conclaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=90000/conclaje;

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|----------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 68 | 66 | 0.001 | 0.008 | 0.258 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 65 | 65 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| SAVEVALUE | | RETRY | VALUE | | | | | |
| TON | | 0 | 2535.000 | | | | | |
| TOTAL_DIAS | | 0 | 35.503 | | | | | |

Anexo 8: GPSS Interfaz con 6 camiones con su resultado

```

GPSS MCMXVII [SISTEMAS DE GESTIÓN DE FLOTA, MCMXVII]
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL XSTON,0
INITIAL XETOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,0,0.5,,6
ADVANCE 1
PALA ADVANCE 18
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.0
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13
CONTROL SATE NU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST X 02,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,-39
ASSIGN 0,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 4
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA
FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS*(XSTON))
TERMINATE 0
START 1
PROCEDURE NUMDIAS(come1a5e) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=90000/come1a5e;

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 72 | 69 | 0.002 | 0.017 | 0.403 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 69 | 69 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2691.000 |
| TOTAL DIAS | 0 | 33.445 |

Anexo 9: GPSS Interfaz con 7 camiones con su resultado

```

GPSS Vnm11 - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA MCG
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL XSTON,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0
GENERAL
  GENERATE 1,8,0.5,,7
  ADVANCE 1
VALA
  ADVANCE 13
  QUEUE QPAL
  SEIZE PAL
  DEPART QPAL
  ADVANCE 1.8
  ASSIGN 2,1
  RELEASE PAL
  ADVANCE 13
CONTROL
  RATE NU VIA,ESPERA
  SEIZE VIA
  ADVANCE 4
  RELEASE VIA
  TEST E E2,1,RELOJ
  QUEUE QPLATAFORMA
  SEIZE PLATAFORMA
  DEPART QPLATAFORMA
  ADVANCE 0.3
  RELEASE PLATAFORMA
  SAVEVALUE TON,33
  ASSIGN 2,2
  TRANSFER ,CONTROL
ESPERA
  ADVANCE 1
  TRANSFER ,CONTROL
RELOJ
  TEST L C1,600,FIN
  TRANSFER ,PALA
FIN
  ADVANCE 1
  SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(XTOTAL_DIAS)
  TERMINATE 7
  START 1
PROCEDURE XTOTALDIAS (conclaje) BEGIN
  TEMPORARY RESULTADO;
  RESULTADO=90000/ton*Laje;
For Help, press F1 Report is Complete. Clock

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|---------|
| QPAL | 1 | 0 | 75 | 71 | 0.004 | 0.032 | 0.594 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2808.000 |
| TOTAL DIAS | 0 | 32.051 |

Anexo 10: GPSS Interfaz con 8 camiones con su resultado

```

GPSS World - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA NICK
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL XTON,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,0,0.5,,0
ADVANCE 1
PALA
  QUEUE OPAL
  SEIZE PAL
  DEPART QPAL
  ADVANCE 1.0
  ASSIGN 2,1
  RELEASE PAL
  ADVANCE 1.3
CONTROL GATE NU VIA,ESPERA
  SEIZE VIA
  ADVANCE 4
  RELEASE VIA
  TEST E ES,1,RELOJ
  QUEUE OPLATAFORMA
  SEIZE PLATAFORMA
  DEPART QPLATAFORMA
  ADVANCE 1.3
  RELEASE PLATAFORMA
  SAVEVALUE TON,39
  ASSIGN 2,2
  TRANSFER ,CONTROL
ESPERA
  ADVANCE 1
  TRANSFER ,CONTROL
RELOJ
  TEST L CL,600,FIN
  TRANSFER ,PALA
FIN
  ADVANCE 1
  SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(HUMDIAS(XTON))
  TERMINATE 9
  STATE 1
PROCEDURE NUMDIAS (tonelaje) BEGIN
  TEMPORARY RESULTADO;
  RESULTADO=90000/tonelaje;
For Help, press F1 Report is Complete.

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 77 | 72 | 0.005 | 0.040 | 0.620 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| SAVEVALUE | | RETRY | | VALUE | | | | |
| TON | | 0 | | 2808.000 | | | | |
| TOTAL_DIAS | | 0 | | 32.051 | | | | |

Anexo 11: GPSS Interfaz con 9 camiones con su resultado

```

GPSS Model [SISTEMA DE GESTIÓN DE PUERTA, NICK]
File Edit Search View Command Window Help
INITIAL X(TON),0
INITIAL X(TOTAL DIAS),0
GENERATE 1,0,0.5,,9
ADVANCE 1
PALA
ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.5
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13
CONTROL GATE NU VIA ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEXT 8 #2,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,-39
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA
ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ
TEXT 8 C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA
FIN
ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL DIAS,(#NUMDIAS(X(TON)))
TERMINATE 9
STACK 1
PROCEDURE NUMDIAS (coneLaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=#0000/coneLaje;

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY | |
|-------------|-----------|-------|-----------|-----------|----------|----------|-------|---|
| QPAL | 1 | 0 | 77 | 71 | 0.007 | 0.052 | 0.663 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 71 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2769.000 |
| TOTAL DIAS | 0 | 32.503 |

Anexo 12: GPSS Interfaz con 10 camiones con su resultado

```

GPSS Model - SISTEMA DE GESTION DE FLOTA NICOL
File Edit Search View Commands Window Help
[Icons]
INITIAL XFTOM,0
INITIAL XQFOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,0,0,0,,10
ADVANCE 1
FALA ADVANCE 13
QUEUE QFAL
SEIZE FAL
DEPART QFAL
ADVANCE 1,8
ASSIGN 2,1
RELEASE FAL
ADVANCE 13
CONTROL GATE HU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST L F2,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE QPLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0,3
RELEASE QPLATAFORMA
SAVEVALUE TON,35
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,FALA
FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(HUNDIAS(XFTOM))
TERMINATE 10
START 1
PROCEDURE UNDEIAS (conclaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=90000/conclaje;
For Help: press F1 Report is Complete.

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QFAL | 1 | 0 | 77 | 70 | 0.007 | 0.057 | 0.632 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2808.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 32.051 |

Anexo 13: GPSS Interfaz con 11 camiones con su resultado

```

GPSSMAN - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA NIGEL
File Edit Search View Command Window Help
[Icons] [Icons] [Icons] [Icons] [Icons] [Icons]
INITIAL XSTON,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,0,0.5,,11
ADVANCE 1
FALA ADVANCE 10
QUEUE QPAL
DEICE QAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.0
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 10
CONTROL GATE NU VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST E P2,1,RELOJ
CUEVE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,39
ASSIGN 0,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,FALA
FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(HUNDIAS(XSTON))
TERMINATE 11
START 1
PROCEDURE HUNDIAS(cc=1a,se) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=00000/cc=1a3a;

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 80 | 72 | 0.008 | 0.057 | 0.573 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| SAVEVALUE | | RETRY | VALUE | | | | | |
| TON | | 0 | 2808.000 | | | | | |
| TOTAL_DIAS | | 0 | 32.051 | | | | | |

Anexo 14: GPSS Interfaz con 12 camiones con su resultado

```

GPSS World - (SISTEMA DE COPIÓN DE FLOTA NICK)
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]

INITIAL XPCOM,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0

DEBRKATK 1.8,0.8,,12
ADVANCE 1

PALA
  ADVANCE 13
  QUEUE QPAL
  SEIZE PAL
  DEPART QPAL
  ADVANCE 1.8
  ASSIGN 2,1
  RELEASE PAL
  ADVANCE 13

CONTROL
  GATE NU VIA,ESPERA
  SEIZE VIA
  ADVANCE 1
  RELEASE VIA
  TEST 2 F2,1,RELOJ

  QUEUE QPLATAFORMA
  SEIZE PLATAFORMA
  DEPART QPLATAFORMA
  ADVANCE 0.3
  RELEASE PLATAFORMA
  SAVEVALUE TON,39
  ASSIGN 2,2
  TRANSFER ,CONTROL

ESPERA
  ADVANCE 1
  TRANSFER ,CONTROL

RELOJ
  TEST 1 C1,600,FIN
  TRANSFER ,PALA

FIN
  ADVANCE 1
  SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUNDIAS(XSTON))
  TERMINATE 12
  START 1

PROCEDURE NUNDIAS(con=1aje) BEGIN
  TEMPORARY RESULTADO;
  RESULTADO=90000/con=1aje;
  For Holo.ress F1 Report is Complete.

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 79 | 70 | 0.008 | 0.058 | 0.513 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 74 | 74 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2886.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 31.185 |

Anexo 15: GPSS Interfaz con 13 camiones con su resultado

```

GPSS World - SISTEMA DE CONTROL DE DGT-A-NICG
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]

INITIAL  X(TON),0
INITIAL  X(TOTAL_DIAS),0

GENERATE 1,6,0.5,,13
ADVANCE 1

VALA
  QUEUE 13
  SEIZE  QPAL
  DEPART QPAL
  ADVANCE 1.8
  ASSIGN 2,1
  RELEASE QPAL
  ADVANCE 13

CONTROL  GATE NU VIA,ESPERA
          SEIZE VIA
          ADVANCE 4
          RELEASE VIA
          TEST L 02,1,RELOJ
          QUEUE QPLATAFORMA
          SEIZE QPLATAFORMA
          DEPART QPLATAFORMA
          ADVANCE 0.3
          RELEASE QPLATAFORMA
          SAVEVALUE TON,-39
          ASSIGN 2,2
          TRANSFER ,,CONTROL

ESPERA  ADVANCE 1
        TRANSFER ,,CONTROL

RELOJ  TEST L 01,600,FIN
        TRANSFER ,,FALLA

FIN  ADVANCE 1
      SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUNDIAS*(XTON))
      TERMINATE 13
      START 1

PROCEDURE NUNDIAS(cocle1a) BEGIN
  TEMPARY RESULTADO:
  RESULTADO=90000/cocle1a;

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY | |
|-------------|-----------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|---|
| QPAL | 1 | 0 | 80 | 71 | 0.008 | 0.058 | 0.513 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2808.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 32.051 |

Anexo 17: GPSS Interfaz con 15 camiones con su resultado

```

GPSS WinM [SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA NICK]
File Edit Search View Commands Window Help

INITIAL XSTON,0
INITIAL XCTOTAL_DIAS,0

GENERATE 1,0,0.5,,15
ADVANCE 1

PALA
ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.8
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13

CONTROL GATE NU VIA ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST L PD,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,35
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL

ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL

RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA

FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS*(XSTON))
TERMINATE 15
START 1

PROCEDURE NUMDIAS (conelaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=90000/conelaje;

```

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|---------|
| QPAL | 1 | 0 | 82 | 71 | 0.008 | 0.061 | 0.458 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 72 | 72 | 0.000 | 0.000 | 0.000 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2808.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 32.051 |



Anexo 19: GPSS Interfaz con 17 camiones con su resultado

```

GPSSMEX18 - INSTITUTO DE GESTIÓN DE FLOTA NUCI
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL XSTON,0
        XSIGUAL_DIAS,0
        GENERATE 1,8,0.5,,17
        ADVANCE 1
FALA ADVANCE 13
        QUEUE QPAL
        SEIZE  PAL
        DEPART  QPAL
        ADVANCE 1.0
        ASSIGN  2,1
        RELEASE PAL
        ADVANCE 13
CONTROL GATE NU VIA,ESPERA
        SEIZE  VIA
        ADVANCE 4
        RELEASE VIA
        TEST  E  F2,1,RELOJ
        QUEUE QPLATAFORMA
        SEIZE  PLATAFORMA
        DEPART QPLATAFORMA
        ADVANCE 0.3
        RELEASE PLATAFORMA
        SAVEVALUE TON,39
        ASSIGN  2,2
        TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 1
        TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST  L  C1,600,FIN
        TRANSFER ,FALA
FIN ADVANCE 1
        SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMERIAS(XSTON))
        TERMINATE 17
        STAT 1
PROCEDURE NUMERIAS(=conclaje) BEGIN
        TEMPORARY RESULTADO;
        RESULTADO=90000/=(conclaje);
For Help, press F1 Report is Complete.

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 83 | 72 | 0.008 | 0.061 | 0.458 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 74 | 74 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2886.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 31.185 |

Anexo 20: GPSS Interfaz con 18 camiones con su resultado

```

GPSS World - SISTEMA DE GESTIÓN DE FICHA NCG
File Edit Search View Command Window Help
[Icons] [?]
INITIAL XSTON,0
INITIAL XFTOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,8,0.8,,18
ADVANCE 1
PALA
ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1.8
ASSIGN 2,1
RELEASE PAL
ADVANCE 13
CONTROL
SATE NU VIA ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST E F2,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0.3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,35
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA
ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ
TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA
FIN
ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS(XSTON))
TERMINATE 18
START 1
PROCEDURE NUMDIAS(conclaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=80000/conclaje;
For Help, press F1 Report is Complete.

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 85 | 73 | 0.009 | 0.061 | 0.431 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 73 | 73 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2847.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 31.612 |

Anexo 21: GPSS Interfaz con 19 camiones con su resultado

```

GPSS Work - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLOTA NICK
File Edit Search View Command Window Help
[Icons]
INITIAL XSTON,0
INITIAL XTOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,0,0,0,,19
ADVANCE 1
VALA ADVANCE 10
QUEUE QPAL
SEIZE PAL
DEPART QPAL
ADVANCE 1,0
ASSIGN 0,1
RELEASE PAL
ADVANCE 10
CONTROL RATE HQ VIA,ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST E EQ,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0,1
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,30
ASSIGN 0,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST L C1,000,FIN
TRANSFER ,PALA
FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUNDIAS(XSTON))
TERMINATE 10
START 1
PROCEDURE NUNDIAS(conclaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=00000/conclaje;
For Help, press F1 Report is Complete. Clock

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 87 | 75 | 0.009 | 0.060 | 0.431 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 74 | 74 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2886.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 31.185 |

Anexo 22: GPSS Interfaz con 20 camiones con su resultado

```

GPSS World - SISTEMA DE GESTIÓN DE FLUJO NÚM.
File Edit Search View Command Window Help
[Icons] [?]
INITIAL XSEMI,0
INITIAL XPTOTAL_DIAS,0
GENERATE 1,8,0,8,,20
ADVANCE 1
PALA ADVANCE 13
QUEUE QPAL
SEIZE PRL
DEPART QPAL
ADVANCE 1,0
ASSIGN 2,1
RELEASE PRL
ADVANCE 13
CONTROL GATE NU VIA ESPERA
SEIZE VIA
ADVANCE 4
RELEASE VIA
TEST E F2,1,RELOJ
QUEUE QPLATAFORMA
SEIZE PLATAFORMA
DEPART QPLATAFORMA
ADVANCE 0,3
RELEASE PLATAFORMA
SAVEVALUE TON,39
ASSIGN 2,2
TRANSFER ,CONTROL
ESPERA ADVANCE 1
TRANSFER ,CONTROL
RELOJ TEST L C1,600,FIN
TRANSFER ,PALA
FIN ADVANCE 1
SAVEVALUE TOTAL_DIAS,(NUMDIAS*(X*TON))
TERMINATE 20
START 1
PROCEDURE NUMDIAS(tonLaje) BEGIN
TEMPORARY RESULTADO;
RESULTADO=#0000/tonLaje;
For Help, press F1 Report is Complete. Clock

```

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------------|-----|-------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| QPAL | 1 | 0 | 85 | 72 | 0.009 | 0.064 | 0.418 | 0 |
| QPLATAFORMA | 1 | 0 | 74 | 74 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE |
|------------|-------|----------|
| TON | 0 | 2886.000 |
| TOTAL_DIAS | 0 | 31.185 |