

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Optimización del ciclo de carguío y acarreo mediante la
implementación de rangos operativos para los indicadores queue
y hang en una mina a tajo abierto**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Christian Hugo Ghiggo Retuerto

 [0009-0005-1683-5672](https://orcid.org/0009-0005-1683-5672)

Asesor

MBA. Victor Manuel Hernández Diaz

 [0000-0002-6505-0733](https://orcid.org/0000-0002-6505-0733)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Ghiggo Retuerto [1]
Referencia/Reference	[1] C. Ghiggo Retuerto, " <i>Optimización del ciclo de carguío y acarreo mediante la implementación de rangos operativos para los indicadores queue y hang en una mina a tajo abierto.</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Ghiggo, 2025)
Referencia/Reference	Ghiggo, C. (2025). <i>Optimización del ciclo de carguío y acarreo mediante la implementación de rangos operativos para los indicadores queue y hang en una mina a tajo abierto.</i> [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico esta tesis con mucho cariño y gratitud a mis padres, por motivarme a concluir la titulación; a mis abuelos por estar siempre a mi lado brindándome su cariño y apoyo, a Yuriko por todo su apoyo y creer en mí y a mis amigos por el soporte en los momentos complicados.

Agradecimientos

A todo el equipo de la Gerencia Mina de Marcobre, por la confianza para realizar esta tesis de la realidad de la operación minera. Aprecio profundamente las demostraciones de confianza y amistad con mi persona; la formación que me brindaron desde mis inicios como practicante hasta la actualidad como Ingeniero de Minas me ha brindado valores que aplicaré en mi vida profesional.

A los MBA. Ing. Victor Manuel Hernandez Diaz e Ing. Adolfo Jesus Chavez Valdivia por el soporte y acompañamiento en este proceso de elaboración de la tesis. Sus sugerencias, revisiones y puntos de vista han sido fundamentalmente para la conclusión de esta tesis.

Resumen

El objetivo del presente trabajo es definir los intervalos en los que debemos mantener los valores de los indicadores Queue y Hang – que determinan la eficiencia de acarreo y carguio respectivamente – para optimizar los ciclos de acarreo con camiones (CAT 793D – 233 t) y palas electrohidráulicas (Hitachi EX5600 - 27 m³). Para la determinación de estos intervalos de trabajo se utilizó el criterio del Fleet Match para el análisis entre los equipos de carguio y acarreo, los datos utilizados para el análisis se obtuvieron del registro histórico de ciclos registrados en el sistema de gestión de flota (toneladas movidas, tiempo queue, tiempo hang, tiempo spot, tiempo de carguio, tiempo de ciclo de acarreo) y datos históricos de costos de carguio y acarreo. El método de trabajo es analítico, se analizaron dos escenarios para la determinación de los rangos de trabajo de los indicadores queue y hang: Escenario de exceso de camiones y escenario de falta de camiones; para ambos casos el análisis contempló 2 criterios: obtener el mínimo costo por tonelada y maximizar la productividad de los equipos (maximizar la productividad del equipo de carguio para el caso de exceso de camiones y maximizar la productividad del equipo de acarreo para el caso de falta de camiones). Como resultados de los análisis se obtuvo que para el caso de exceso de camiones el parámetro Queue (minutos) debe oscilar entre 0.8 (costo mínimo) y 5.27 (productividad de carguio máxima), el tiempo hang (minutos) oscilar entre 0.05 (productividad de carguio máxima) y 0.66 (costo mínimo), considerando los valores ideales de Queue y Hang (minutos) en 1.9 y 0.3 respectivamente para el equilibrio de eficiencias (match factor = 1); y en el caso de falta de camiones el parámetro Queue (minutos) debe oscilar entre 0.86 (máxima productividad de acarreo) y 0.96 (costo mínimo), el tiempo Hang (minutos) entre 0.67 (costo mínimo) y 0.78 (máxima productividad de acarreo), considerando los valores ideales de Queue y Hang (minutos) en 1.69 y 0.27 respectivamente para el equilibrio de eficiencias.

Palabras clave: fleet match, match factor, queue, hang, productividad de acarreo, productividad de carguio, etc.

Abstract

The objective of this study was to define the optimal intervals of the Queue and Hang indicators — which represent haulage and loading efficiency, respectively — in order to optimize the haul cycles of trucks (CAT 793D – 233 t) and electric-hydraulic shovels (Hitachi EX5600 – 27 m³). To determine these intervals, the fleet match criteria was applied to analyze the interaction between loading and hauling equipment. The data used were obtained from historical fleet management system records (moved tonnage, queue time, hang time, spotting time, loading time, and haul cycle time), as well as historical loading and hauling cost data.

The research followed an analytical approach, considering two scenarios: truck surplus and truck shortage. In both cases, two optimization criteria were applied: (i) minimizing the unit cost per ton and (ii) maximizing equipment productivity (shovel productivity in the surplus scenario and truck productivity in the shortage scenario). The results showed that, in the case of truck surplus, Queue time should range between 0.8 min (minimum cost) and 5.27 min (maximum shovel productivity), while Hang time should range between 0.05 min (maximum shovel productivity) and 0.49 min (minimum cost), with ideal values of 1.9 and 0.3 min, respectively, to achieve a match factor of 1. In the case of truck shortage, Queue time should vary between 0.86 min (maximum truck productivity) and 0.96 min (minimum cost), while Hang time should range between 0.67 min (minimum cost) and 0.78 min (maximum truck productivity), with ideal values of 1.69 and 0.27 min, respectively, to reach efficiency balance.

It is concluded that determining optimal ranges of Queue and Hang represents an effective tool for improving productivity and reducing operating costs in open-pit mining operations.

Keywords: fleet match, match factor, queue, hang, haulage productivity, loading productivity, mining optimization.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Formulación del Problema.....	2
1.2.1 Problema General.....	2
1.2.2 Problemas Específicos.....	2
1.3 Justificación de la investigación.....	2
1.3.1 Técnica.....	2
1.3.2 Económica.....	2
1.4 Objetivos del estudio.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivo específico.....	3
1.5 Hipótesis de la tesis.....	3
1.5.1 Hipótesis general.....	3
1.5.2 Hipótesis específica.....	3
1.6 Antecedentes investigativos.....	4
1.6.1 Antecedentes nacionales.....	4
1.6.2 Antecedentes internacionales.....	5
1.6.3 Variables e indicadores.....	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Marco teórico.....	8
2.1.1 Minería.....	8
2.1.2 Minería a tajo abierto.....	8

2.1.3	Importancia de las operaciones unitarias de carguío y acarreo	8
2.1.4	Sistemas de carguío y acarreo en minería a tajo abierto.....	9
2.1.5	El ciclo de acarreo.....	10
2.1.6	El ciclo de carguio	12
2.1.7	Indicadores de control clave en el ciclo de carguio y acarreo	13
2.1.8	Productividad en minería a tajo abierto	14
2.1.9	Match Factor (MF) o Factor de Acoplamiento (FA).....	14
2.1.10	Factores que afectan a las curvas teóricas de carguío y acarreo	15
2.1.11	Fleet Match	17
2.1.12	Costo unitario total de producción por tonelada	20
2.1.13	Criterios de evaluación para los rangos operativos de trabajo.....	21
2.1.14	Uso de información histórica de la operación.....	23
2.1.15	Fleet Management Systems (FMS)	23
2.1.16	Sistema de Gestión de Flota de Minesense for Miners (MS4M)	24
2.1.17	Modelo de tiempos de equipos.....	27
2.1.18	Parámetros de desempeño de los equipos	28
2.2	Marco Conceptual	29
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		32
3.1	Descripción del proyecto	32
3.2	Características Operativas	33
3.3	Resultados de desempeño de la operación.....	34
3.4	Estudio de la situación actual.....	36
3.5	Plan de mejora de la situación actual	43
3.6	Cálculo de los rangos operativos de los indicadores Queue y Hang	45
3.6.1	Caso Overtruck (Exceso de camiones)	46
3.6.2	Caso Undertruck (déficit de camiones).....	51
3.7	Rangos operativos de queue y hang seleccionados.....	55
3.8	Eficiencias de carguío y acarreo para los escenarios seleccionados.....	56

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	57
4.1 Aplicación de los rangos operativos a la operación	57
4.2 Comparación de indicadores antes y después de la implementación.....	57
4.3 Prueba de Hipótesis.....	60
4.4 Otros resultados operativos	65
4.5 Proyección de ahorro económico de la implementación.....	67
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	71
Referencias bibliográficas.....	72
Anexos	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia	7
Tabla 2 : Resumen de indicadores de producción desde 2021-2023.....	34
Tabla 3 : Indicadores del ciclo de carguío en Palas enero-setiembre 2023.....	36
Tabla 4 : Indicadores de acarreo por equipo de carguío enero-setiembre 2023	37
Tabla 5 : Periodos de análisis para la comparación de resultados.....	57
Tabla 6 : Indicadores Queue, Hang, Productividad de carguío tras implementación....	60
Tabla 7 : Estadísticas de cola de camiones antes y después de implementación.....	61
Tabla 8 : Probabilidad de tiempo de cola de camiones menor a 1.53 minutos.....	63
Tabla 9 : Productividad de carguío antes y después de implementación	63
Tabla 10: Probabilidad de productividad de carguío de palas menor a 3550 t/h	65
Tabla 11: Indicadores del ciclo de carguío en Palas julio-diciembre 2023	65
Tabla 12: Indicadores de acarreo por equipo de carguío julio-diciembre 2023	66
Tabla 13: Indicadores que mejoraron rendimiento con la implementación.....	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ciclo de Acarreo	11
Figura 2 : Distribución de costos asociados a la operación minera	12
Figura 3 : Ciclo de carguío.....	13
Figura 4 : Curva de producción teórica	15
Figura 5 : Producción real y teórica del sistema pala-camión	17
Figura 6 : Fleet Match Overtruck	18
Figura 7 : Fleet Match Undertruck	19
Figura 8 : Costo total por tonelada vs FM-overtruck	21
Figura 9 : Criterio del Costo mínimo	22
Figura 10: Ciclo convencional y no convencional.....	25
Figura 11: Vista del formulario de Registro Ciclos	27
Figura 12: Modelo de tiempos	28
Figura 13: Ruta de llegada a la operación minera Mina Justa.....	32
Figura 14: Distribución de infraestructura de la operación	33
Figura 15: Cola de camiones por Pala.....	38
Figura 16: Hang por Pala.....	38
Figura 17: Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 01	39
Figura 18: Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 02	40
Figura 19: Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 03	40
Figura 20: Productividad de carguío por Pala	41
Figura 21: Queue vs Productividad de carguío de pala	42
Figura 22: Hang vs Productividad de carguío de pala.....	43
Figura 23: Eficiencia de carguío – Costo horario – Productividad vs FM-overtruck	46

Figura 24: Queue(min) vs Queue (%).....	47
Figura 25: Hang(min) vs Hang (%)	48
Figura 26: Eficiencia de acarreo – Costo horario – Productividad vs FM-undertruck	52
Figura 27: Cola de camiones por Pala - Implementación.....	58
Figura 28: Hang por Pala - Implementación.....	59
Figura 29: Productividad de carguío por Pala - Implementación.....	59
Figura 30: Tabla de Distribución Normal Standard 1	61
Figura 31: Tabla de Distribución Normal Standard 2	64

Introducción

En minería a tajo abierto, el sistema pala-camión es el más común en las operaciones unitarias de carguío y acarreo. La eficiencia de este sistema dependerá de la gestión que se realice entre los equipos de carguío (palas o excavadores) y los equipos de acarreo (camiones). La falta de equilibrio entre la asignación del equipo de carguío y acarreo se traducirá en la generación de tiempos improductivos y aumento significativo de los costos operativos.

Dentro de estos tiempos improductivos asociados a las operaciones de carguío y acarreo se encuentran el tiempo queue, que se refiere a la cola de camiones en el equipo de carguío y el tiempo hang, que viene a ser el tiempo de espera del equipo de carguío por camiones. Ambos indicadores afectan directamente a la productividad de la flota de acarreo y carguío respectivamente.

La presente tesis busca determinar los rangos de operación óptimos para los indicadores queue y hang en una operación minera a tajo abierto. Para ello se utiliza el concepto de Match Factor (MF), el cual se presenta como una herramienta analítica que permitirá la evaluación del sistema pala-camión a partir de los escenarios de equilibrio ($MF=1$), exceso de camiones ($MF > 1$) o falta de camiones ($MF < 1$). Para el análisis, se utilizó el registro de 3 meses de ciclos de camiones en palas registrado en el sistema de gestión de flota (FMS).

Al tener claro los rangos de trabajo de los tiempos queue y hang para los distintos escenarios que se presentan en la operación nos permitirá en todo momento tomar las mejores decisiones con fin de utilizar eficientemente los recursos limitados y optimizar nuestros resultados operativos.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema

En la gestión de flotas mineras, el control de los indicadores de cola de camiones (queue) y tiempo de espera de equipo de carguío (hang) son claves para determinar la productividad de flotas y para que estas productividades sean óptimas debemos lograr un equilibrio entre la asignación de equipo de acarreo a la flota de carguío.

En la operación minera bajo estudio, se cuenta con el registro histórico de ciclos en el sistema de gestión de flota y en ellos se evidencia que los valores de queue y hang varían ampliamente a lo largo de las horas durante los turnos de trabajo, lo que significa mayor o menor eficiencia según las condiciones operativas. En escenarios de exceso de camiones, se incrementa el tiempo de cola de camiones lo que ocasiona un mayor costo por tonelada transportada dado que disminuye la productividad de acarreo. En escenarios de déficit de camiones, aumenta el tiempo de espera de los equipos de carguío, disminuyendo su productividad y subutilizando la capacidad del equipo de carguío.

Actualmente la empresa no cuenta con un estudio que determine los rangos adecuados de queue y hang para optimizar el uso de recursos según los escenarios de exceso o déficit de camiones. La falta de estos parámetros de referencia limita la capacidad de tomar decisiones oportunas de los supervisores de despacho para la asignación de flota, afectando a la eficiencia de la flota.

Es por eso que es necesario usar herramientas de análisis como el Fleet Match, dado que según Pando (2003), el Fleet Match puede expresarse en función de las eficiencias de acarreo y carguío; ello nos permite calcular los intervalos óptimos de queue y hang según los escenarios de disponibilidad de camiones. Determinar estos rangos de trabajo nos proporcionará una gran oportunidad de optimizar los recursos disponibles en cada momento durante un turno de trabajo, reducir costos operativos y maximizar la productividad de la operación.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

- ¿Cuáles son los rangos operativos óptimos de los tiempos queue y hang que permitan reducir el tiempo de espera de los equipos y maximizar la productividad de las flotas de carguío y acarreo aplicando el criterio del Fleet Match?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Qué efectos tienen los indicadores queue y hang en la eficiencia de la flota de acarreo y carguío?
- ¿Cuáles son las eficiencias de carguío y acarreo necesarias al aplicar el Fleet Match en escenarios de déficit y exceso de camiones?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Técnica

Este trabajo de tesis permite optimizar el sistema pala-camión a través del control de indicadores claves para la productividad como el queue y hang a través del manejo de rangos operativos óptimos para los indicadores mencionados; esto permitirá a los supervisores de despacho tomar decisiones efectivas para el control de flota, mejorando el rendimiento global de la operación.

1.3.2 Económica

El aumento de los tiempos improductivos en el ciclo de carguío y acarreo provoca tener que asumir costos ocultos disfrazados como baja productividad. La aplicación de este trabajo de tesis permitirá producir toneladas de material al mínimo costo y maximizar la productividad de las flotas de carguío y acarreo dependiendo de las condiciones operativas que se encuentran en campo.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo General

- Establecer los rangos de trabajo de los indicadores queue y hang que permitan optimizar el ciclo de carguío y acarreo en la operación minera aplicando el criterio del Fleet Match.

1.4.2 Objetivo específico

- Analizar los indicadores de queue y hang registrados en el FMS y relacionar su impacto en las productividades.
- Calcular las eficiencias de carguío y acarreo requeridas para los escenarios de déficit y exceso de camiones.

1.5 Hipótesis de la tesis

1.5.1 Hipótesis general

- La implementación de rangos operativos de los indicadores queue y hang aplicando el criterio del Fleet Match permitirá reducir el tiempo en cola de camiones en un 10% al target actual (1.7 minutos) sin comprometer el target de productividad de palas (3550 t/h).

1.5.2 Hipótesis específica

- A mayores valores de los indicadores queue y hang, la eficiencia de carguío y acarreo disminuye considerablemente, disminuyendo la productividad de las flotas.
- La implementación de los rangos operativos de queue y hang según escenarios de exceso o déficit de camiones permitirá mantener los tiempos de espera de los equipos por debajo de los targets actuales.

1.6 Antecedentes investigativos

1.6.1 Antecedentes nacionales

Según Castillo (2014), la relación pala-camión es determinante para la productividad y costos de la operación; motivo por el cual hace uso del concepto de Match Factor para aplicarlo a los datos registrados en el sistema de gestión de flota en distintos escenarios, obteniendo un Match Factor de 1.172, lo cual evidencia que se tiene una flota de camiones ligeramente sobredimensionada para la capacidad de carguío, generando cola en las palas. Adicional a este resultado, se incluyeron variables de disponibilidad mecánica y uso, lo cual permite tomar decisiones dinámicas según las condiciones operativas y logrando un mayor control del balance de camiones, detectando ineficiencias del proceso de asignación.

Loza (2022), aplicó el criterio Match Factor para balancear el sistema pala-camión en Mina 14 Shougang Hierro Perú S.A. Comparó los resultados operativos aplicando el Match Factor y sin aplicarlo, evidenciando mejoras en el tiempo de ciclo de camiones, reducción de costos unitarios y aumento de rendimiento de las flotas de carguío y acarreo. El estudio evidencia que aplicando el Match Factor para equilibrar la asignación de camiones a los equipos carguío reduce colas en el acarreo y la espera de las palas, elevando la productividad de las flotas de carguío y acarreo.

Chavez (2023), estudió el impacto de las demoras operativas en la flota de acarreo de una mina polimetálica a tajo abierto, a través de registros históricos de en el sistema de gestión de flota. Identificó las principales causas de ineficiencia, siendo las 3 más impactantes: la falta de operador, el cambio de turno y el refrigerio. Tras implementar un plan de mejora específico logró reducir las demoras impactando positivamente en la productividad de flota de acarreo y costos de operación.

1.6.2 Antecedentes internacionales

Poblete (2010), estudió el costo de oportunidad en la utilización de sistemas de gestión de flota en minería a tajo abierto, donde se evidenció que la falta de uso de estas herramientas tecnológicas genera una gran brecha entre los resultados actuales y la producción óptima que se puede obtener de aprovechar los beneficios del FMS. Se utilizó una metodología basada en programación lineal para cuantificar el costo de oportunidad de una asignación de flota ineficiente, demostrando que el uso de un sistema de gestión de flota no solo mejora la eficiencia de los procesos de carguío y acarreo sino también los costos asociados al transporte como el combustible y los neumáticos.

González (2018), buscó optimizar la relación pala-camión elaborando un modelo evaluativo para el cálculo de la flota de equipos de carguío y transporte en una operación a tajo abierto. Para ello elaboró modelos de carguío (manual y automático) y de acarreo basados en tiempo de ciclo obtenidos de la herramienta Haulage Profile (Vulcan), incorporando variables del ciclo de acarreo además de aplicar el criterio del Match Factor entre equipos. Los resultados mostraron que el modelo automático logró un cumplimiento mayor al plan de producción (102.4%) y que el modelo de transporte redujo entre 4.8% y 9% la cantidad de camiones asignados sin afectar la producción de manera negativa.

Muñoz (2024), propuso un modelo de planificación operativa para la flota de carguío y transporte de la operación minera Lomas Bayas (Chile) a partir del análisis del rendimiento del proceso de carguío y acarreo usando datos históricos, identificando los parámetros que impactan en mayor manera al rendimiento (tiempo de carguío, tiempo de acomodo, tiempo hang) y su correlación con la eficiencia operativa. A través de este análisis estima para equipos mayores tiempos promedio de carguío de 3,35 min (flota P&H 4100) y 5,43 min (flota P&H 2800), y concluye que el acarreo es el cuello de botella para la capacidad global de la operación. Como consecuencia de este análisis elabora un mapa de generación de valor orientado a acciones específicas de mejora diaria de parámetros que no se cumplen el objetivo, enfocando esfuerzos en aquellos parámetros que tienen mayor impacto.

1.6.3 Variables e indicadores

Variables independientes

- Tiempo queue
- Tiempo hang

Variables dependientes

- Costo unitario (\$/t)
- Productividad (t/h)
- Eficiencia de acarreo (%)
- Eficiencia de carguío (%)

Indicadores

- Toneladas por hora cargadas (t/h)
- Toneladas por hora acarreadas (t/h)
- Minutos de espera de camiones en pala
- Minutos de espera de pala por camiones

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Problema general: ¿Cuáles son los rangos operativos óptimos de los tiempos queue y hang que permitan reducir el tiempo de espera de los equipos y maximizar la productividad de las flotas de carguío y acarreo aplicando el criterio del Fleet Match?	Objetivo general: Establecer los rangos de trabajo de los indicadores queue y hang que permitan optimizar el ciclo de carguío y acarreo en la operación minera aplicando el criterio del Fleet Match.	Hipótesis general: La implementación de rangos operativos de los indicadores queue y hang aplicando el criterio del Fleet Match permitirá reducir el tiempo en cola de camiones en un 10% al target actual (1.7 minutos) sin comprometer el target de productividad de palas (3550 t/h).	Dependientes: Productividad (t/h) Independientes: Tiempo Queue (min) Tiempo Hang (min)	Toneladas/horas cargadas Toneladas/horas acarreadas Minutos de cola de camiones Minutos de espera de pala por camión	Registros históricos de ciclos del FMS Registros de costos operativos Observación y análisis de reportes operativos
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables	Indicadores	Técnicas de Recolección de datos
¿Qué efectos tienen los indicadores queue y hang en la eficiencia de la flota de acarreo y carguío?	Analizar los indicadores de queue y hang registrados en el FMS y relacionar su impacto en las productividades.	H1: A mayores valores de los indicadores queue y hang, la eficiencia de carguío y acarreo disminuye considerablemente, disminuyendo la productividad de las flotas.	Dependiente: Productividad (t/h) Independiente: Queue, Hang	t/h min de cola min de espera	Datos históricos FMS Procesamiento estadístico
¿Cuáles son las eficiencias de carguío y acarreo necesarias al aplicar el Fleet Match en escenarios de déficit y exceso de camiones?	Calcular las eficiencias de carguío y acarreo requeridas para los escenarios de déficit y exceso de camiones.	H2: La implementación de los rangos operativos de queue y hang según escenarios de exceso o déficit de camiones permitirá mantener los tiempos de espera de los equipos por debajo de los targets actuales.	Dependiente: Eficiencia de carguío / acarreo (%) Independiente: Queue, Hang	% eficiencia carguío % eficiencia acarreo	Cálculos derivados de FMS Fórmulas de MF

Nota: Elaboración propia

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Minería

Es una actividad productiva que consiste en la explotación y procesamiento de minerales que se encuentran distribuidos en el suelo y subsuelo formando yacimientos. Según el tipo de mineral a explotar se puede clasificar como: minería metálica -orientado a obtener el elemento metálico como producto final- y minería no metálica -orientado a obtener minerales que no contienen metales (rocas, arenas, arcillas, entre otros). Según el tipo de explotación a desarrollar en el yacimiento se clasifica como: minería subterránea, la cual requiere desarrollo bajo la superficie a base de túneles, y minería a tajo abierto, la cual se desarrolla en la superficie del terreno (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

2.1.2 Minería a tajo abierto

Es un método de explotación de minera superficial, consiste en la remoción progresiva en grandes volúmenes de desmonte y mineral mediante fases y bancos con el fin de extraer de manera rentable los recursos cerca de la superficie del terreno. Se caracteriza por el uso de maquinaria de gran capacidad como cargadores frontales, palas, excavadoras y camiones que permitan desarrollar ciclos continuos en el carguío y acarreo que permitan maximizar la productividad y utilización de los equipos. Dado que mueve mayores tonelajes que la minería subterránea, - la cual es más selectiva por los altos costos de desarrollo y preparación de los frentes de minado – permite el minado de menores leyes, siendo altamente rentable, eficientes y seguro (Hustrulid et al., 2013).

2.1.3 Importancia de las operaciones unitarias de carguío y acarreo

En minería a tajo abierto, las operaciones unitarias de carguío y acarreo son el núcleo del proceso productivo minero, pues permiten transportar el material minado desde los frentes de carguío hacia los destinos, sea stockpile, botaderos o chancadoras para el posterior procesamiento. Representan alrededor del 60% de los costos operativos totales en una empresa minera, por lo que inciden de manera directa en la rentabilidad de los

proyectos y operaciones (Hustrulid et al., 2013). Por tal motivo, iniciativas que fomenten su optimización son fundamentales para impactar en la eficiencia de la operación.

2.1.4 Sistemas de carguío y acarreo en minería a tajo abierto

Importancia del sistema pala-camión. El sistema pala-camión es el más usado en minería a tajo abierto debido a su versatilidad y capacidad de mover grandes volúmenes de material. Una pala electrohidráulica como la Hitachi EX5600 (27 m³) puede cargar a un camión de 233 toneladas como el CAT 793D con 5 o 6 pases (González Vargas, 2018). Esta combinación es efectiva para operaciones mineras de gran escala, pero requiere una gran sincronización entre los equipos, si esta falla, se generarán tiempos improductivos: camiones esperando por un equipo de carguío (queue) o palas esperando la llegada de camiones (hang). Estos tiempos improductivos afectan directamente la productividad de la flota, lo que involucrará mayores costos unitarios de producción por la pérdida de eficiencia del sistema (Chávez, 2023).

Factores que afectan la eficiencia del sistema. Si bien los tiempos improductivos en influyen en la productividad del sistema pala-camión estos se deben a diferentes motivos, entre los cuales destacan:

- Disponibilidad física de los equipos: la falla de los equipos (mantenimiento no programado) y mantenimientos programados condiciona la disponibilidad de los equipos para realizar actividades operativas.
- Condiciones de las vías: tramos de ruta en pendiente, curvas y estado de las vías impactan en la velocidad de los camiones, lo que impacta en los tiempos de ciclo de acarreo (Loza, 2022).
- Gestión de operadores: la experiencia de los operadores, fatiga y el periodo de trabajo durante el turno influye en el rendimiento que puedan sacarle a la flota de carguío y acarreo (Poblete, 2010).
- Gestión de flota: La asignación dinámica o estática que realice el supervisor de despacho condicionará el rendimiento que se obtendrá de las flotas de carguío y acarreo ante las exigencias operativas del turno de trabajo.

Todos estos factores se deben tomar en cuenta para analizar la eficiencia del sistema pala-camión dado que afectan a los indicadores queue y hang que influyen en la productividad del sistema.

2.1.5 El ciclo de acarreo

El ciclo de acarreo describe todas las actividades que realiza un camión desde que viaja vacío hacia un equipo de carguío hasta que descarga el material acarreado en el destino asignado (botadero, stockpile o chancadoras). Estas actividades pueden medirse con precisión a través de un Sistema de Gestión de Flota (FMS), como MS4M, Modular, Jigsaw o Wenco, los cuales registran en tiempo real las actividades del ciclo, permitiendo obtener indicadores confiables para la toma de decisiones en tiempo real (Pando, 2003). Según el sistema de gestión de flota de MS4M, las actividades del ciclo de acarreo se dividen en 11:

- Viajando vacío: Tiempo que demora el camión en llegar al frente de carguío asignado.
- Cola: Tiempo que espera el camión para ser cargado por el equipo de carguío.
- Tiempo listo para cuadrarse: Tiempo que espera el camión para el iniciar a cuadrarse en el equipo de carguío.
- Cuadrando: Tiempo que le toma al camión retroceder para cuadrarse en el equipo de carguío.
- Cuadrado: Tiempo que espera el camión cuadrado en el frente de carguío esperando por carga.
- Cargando: Tiempo que toma el carguío del camión.
- Acarreando: Tiempo que el camión transporta el material cargado por el equipo de carguío hasta el destino.
- Cola en descarga: Tiempo que el camión espera en la descarga.
- Retrocediendo: Tiempo que el camión le toma cuadrarse en la descarga.
- Listo para descargar: Tiempo que espera el camión desde que termina el cuadrado hasta iniciar la descarga.

- Descargando: Tiempo que el camión le toma levantar la tolva hasta que termina la descarga del material en el destino asignado.

$$\text{Tiempo de ciclo de acarreo} = \sum \text{Tiempo de todas las actividades del ciclo} \quad (1)$$

Figura 1

Ciclo de Acarreo

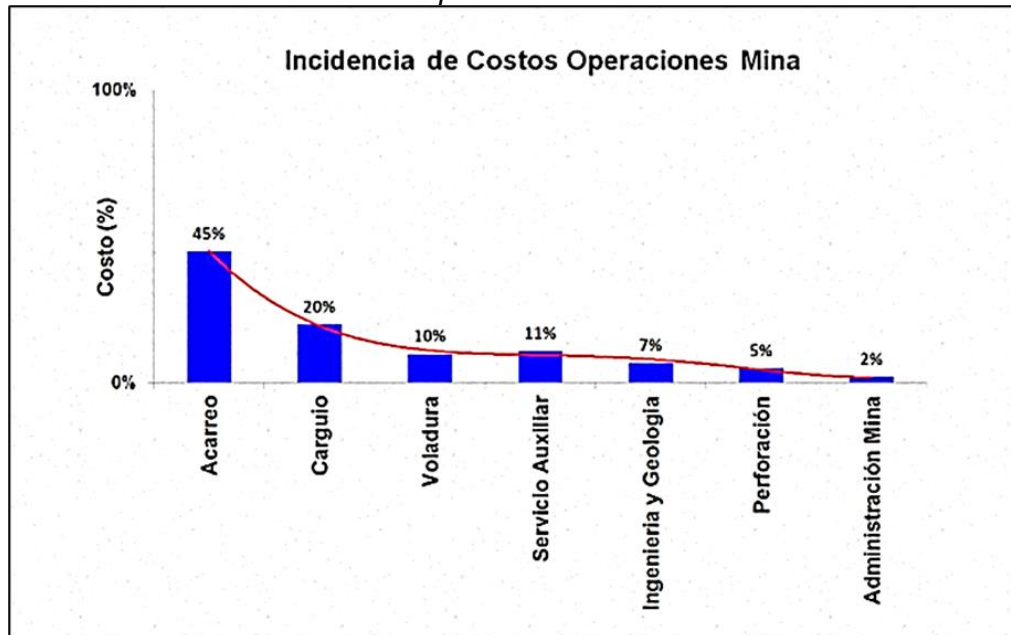


Nota: Manual de operación del sistema Control Sense (2018)

En las empresas mineras con método de explotación a tajo abierto el uso de disponibilidad de los camiones mineros no sobrepasan el 90%, esto sucede por diferentes aspectos, ya sea por mala selección de equipos, mal estado de las vías, tiempos muertos, diseño inadecuado de las vías, todo estos aspectos son problemas para tener mayor producción de material movido dentro de una empresa minera, ya que los equipos no están trabajando el 100% del tiempo que está disponible dentro de la jornada de trabajo. En la Figura 2 se observa que el costo más alto en una empresa minera a tajo abierto es el costo de acarreo de los camiones gigantes que representa el 45% del costo minado, los factores que influyen en alto costo son combustible, llantas y repuestos (Mauricio Quiquia, 2015).

Figura 2

Distribución de costos asociados a la operación minera



Nota: Mauricio (2015)

2.1.6 El ciclo de carguío

El ciclo de carguío describe todas las actividades de una pala, cargador o excavadora para cargar un camión. Consta de 3 actividades asociadas al equipo de carguío:

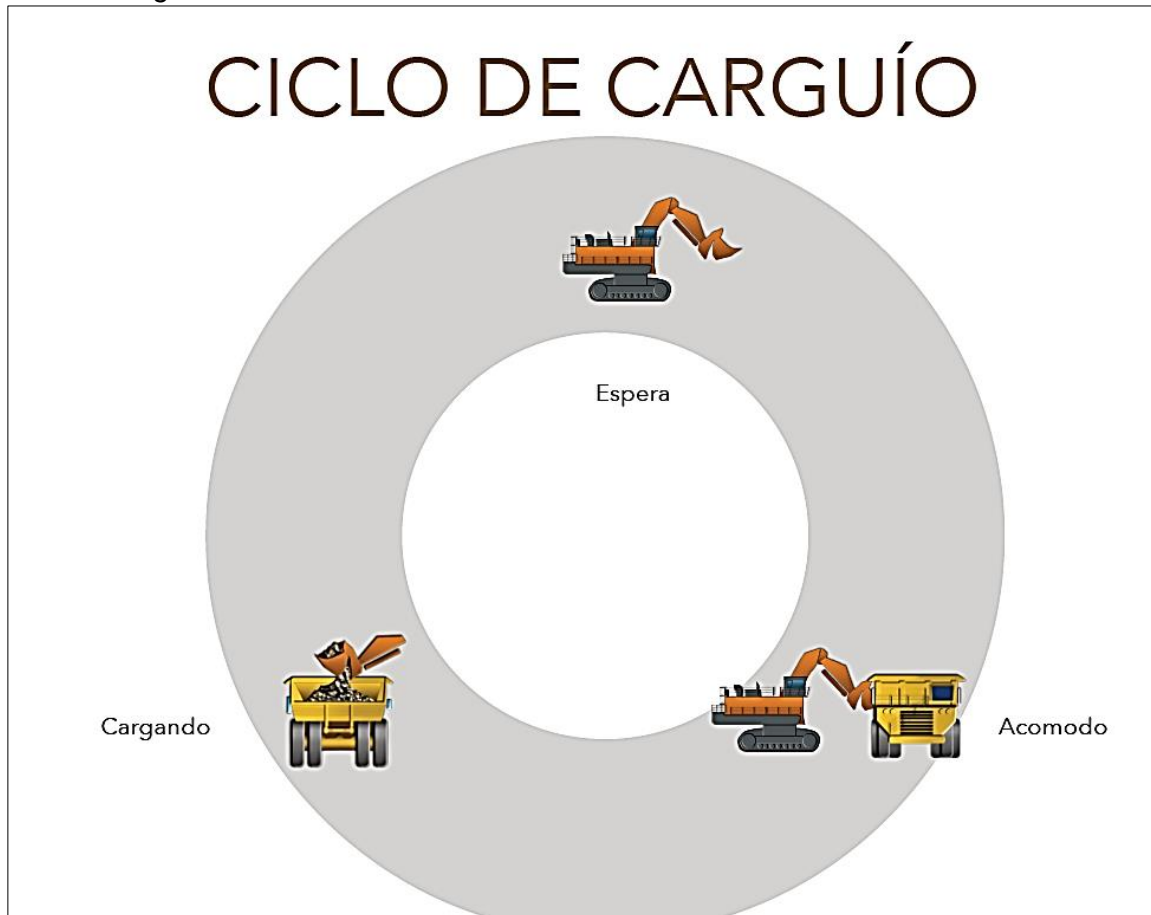
- Cargando: Es el tiempo que le toma al equipo de carguío para llenar completamente la carga del equipo de acarreo.
- Spot: Es el tiempo que toma el cuadrado del camión hasta que la pala echa el primer pase al camión.
- Hang: Es el tiempo que el equipo de carguío espera para que un camión llegue al frente de carguío.

El tiempo que tomen las 3 actividades del ciclo de carguío definen el tiempo de ciclo de carguío.

$$\text{Tiempo de ciclo de carguío} = t_{\text{cargando}} + t_{\text{spot}} + t_{\text{hang}} \quad (2)$$

Figura 3

Ciclo de carguío



Nota: Manual de operación del sistema Control Sense (2018)

2.1.7 Indicadores de control clave en el ciclo de carguío y acarreo

Tiempo Queue. Es el tiempo promedio que los camiones permanecen en cola esperando ser cargados por un equipo de carguío. Un valor elevado de este indicador evidencia que el equipo de carguío está siendo sobreasignado de camiones (Match Factor > 1), lo que generará un aumento en los costos por tonelada debido a la disminución de la productividad de acarreo (Castillo, 2014).

Se define como:

$$Queue(\%) = \frac{Tiempo\ en\ cola}{Tiempo\ operativo\ del\ camión} \times 100\% \quad (3)$$

Tiempo Hang. Es el tiempo promedio que el equipo de carguío se encuentra inactivo por estar esperando la llegada de camiones para continuar cargando material.

Valores elevados de este indicador es característico de escenarios de déficit de camiones (Match Factor < 1), lo que generará una disminución de la productividad de carguío, elevando el costo por tonelada (Loza, 2022).

Se define como:

$$Hang(\%) = \frac{\text{Tiempo de espera de pala}}{\text{Tiempo operativo de pala}} \times 100\% \quad (4)$$

2.1.8 Productividad en minería a tajo abierto

Se define como la cantidad de material movido por unidad de tiempo, normalmente expresada en toneladas por hora (t/h). Se mide tanto para equipos de carguío como de acarreo.

$$\text{Productividad de carguío} = \frac{\text{Toneladas cargadas}}{\text{Tiempo operativo de carguío}} \quad (5)$$

$$\text{Productividad de acarreo} = \frac{\text{Toneladas acarreadas}}{\text{Tiempo operativo de acarreo}} \quad (6)$$

Diversos estudios señalan que la productividad no depende solo del tamaño y capacidad de los equipos, sino también de los factores como los tiempos de ciclo, disponibilidad física y la asignación de flotas (Gonzales, 2018).

En Perú, Loza (2022) evidenció que aplicando el criterio de Match Factor logró aumentar la productividad de flotas en Shougang Hierro Perú, reduciendo los tiempos improductivos. De manera similar, Castillo (2014) en Yanacocha mostró que un desbalance mínimo en la relación pala-camión puede representar pérdidas significativas de productividad acumuladas a lo largo de un turno de trabajo.

Todo esto demuestra que la productividad no es un valor fijo, sino una variable dinámica sujeto a las variaciones de la operación y a la toma de decisiones en tiempo real tomadas en despacho mina.

2.1.9 Match Factor (MF) o Factor de Acoplamiento (FA)

Es la relación que asocia la cantidad adecuada de equipos de acarreo que necesita la flota de carguío, es decir, la cantidad de camiones asignado a cada pala. Teóricamente, el número de camiones asignados absorberán la producción estimada al equipo de carguío

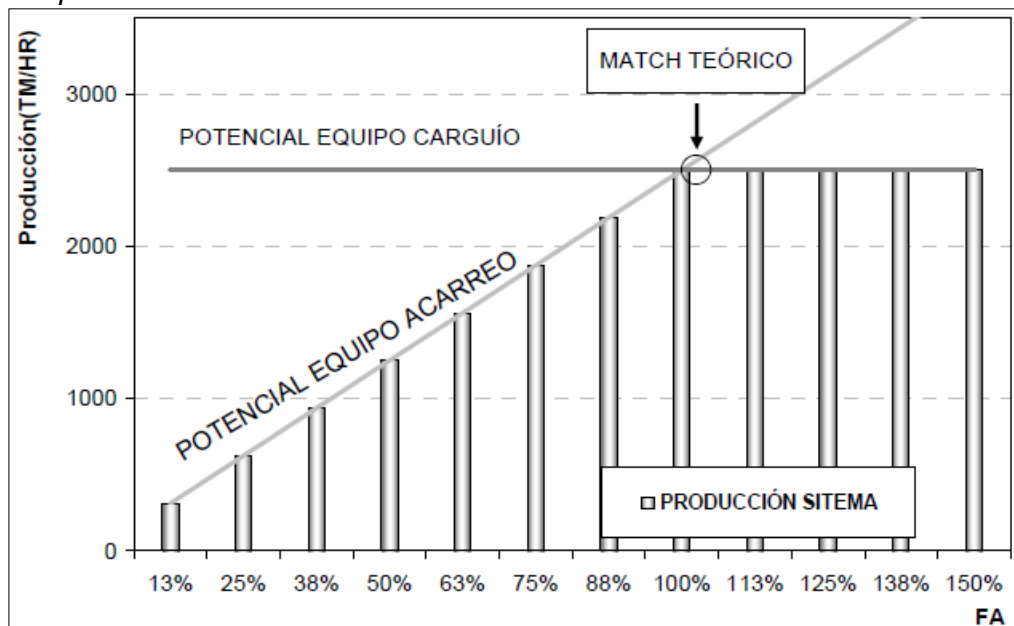
hasta alcanzar la capacidad potencial instalada. La ecuación que define al factor de acoplamiento o match factor es la siguiente:

$$FA = \frac{\#camiones * Productividad\ del\ equipo\ de\ acarreo}{Productividad\ del\ equipo\ de\ carguío} \quad (7)$$

Considerando que los tiempos de ciclo de los equipos de carguío y acarreo son constantes, el factor de acoplamiento dependería de la cantidad de camiones que se asignen.

Figura 4

Curva de producción teórica



Nota: Pando (2003)

Tal como se observa en la Figura 4, donde las curvas de potencial de equipo de carguío y el potencial de equipo de acarreo se interceptan se encuentra el match teórico, al lado derecho del match teórico estamos sobredimensionado el equipo de acarreo y al lado izquierdo estaremos sobredimensionando el equipo de carguío. Las barras verticales representan la producción que se logra por el sistema equipo de carguío-acarreo, estas a su vez están asociadas a un diferente costo por tonelada. (Pando, 2003).

2.1.10 Factores que afectan a las curvas teóricas de carguío y acarreo

La curva potencial de acarreo tiende a disminuir debido a diferentes causas:

Mismatch. Es la interacción entre los camiones y equipos de carguío. Los equipos de carguío nunca deben esperar por camiones y los camiones no deben esperar por los equipos de carguío. Pero para optimizar los camiones, debemos incrementar el hang; y si queremos optimizar el equipo de carguío debemos aumentar el queue de los camiones.

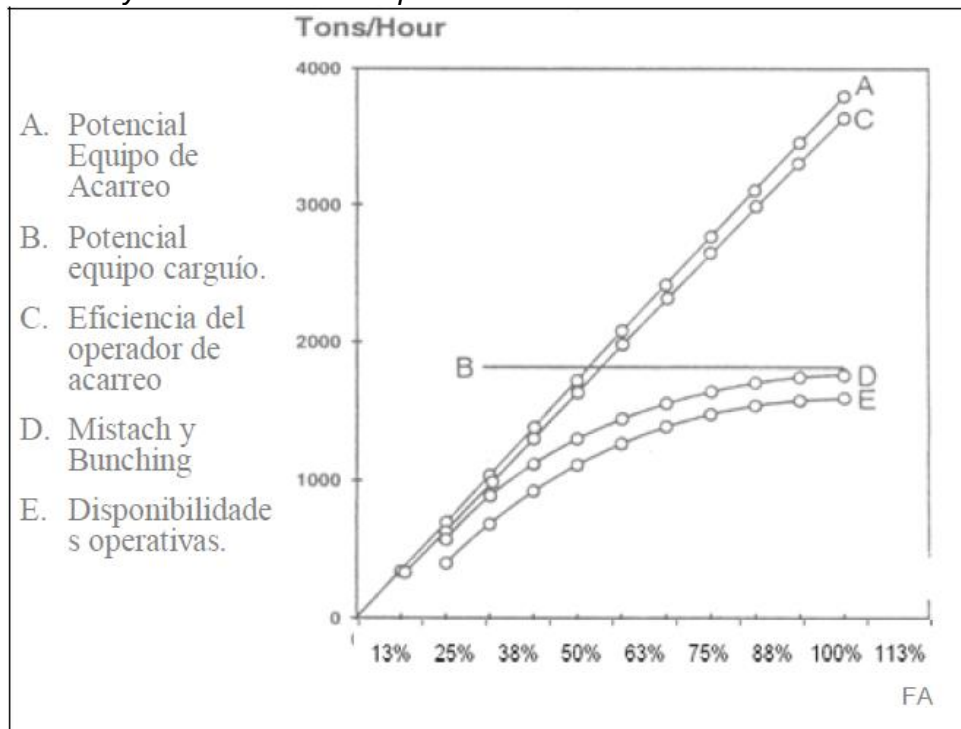
Bunching. Es la variación de los ciclos de camiones y cargadores; esta variación se debe a la presencia de muchos factores tales como diferencia en la velocidad de los camiones, presencia de ondulaciones en las vías de acarreo, diferencias de ruta de acarreo por diferentes tipos de material. Para la variación de los ciclos de carguío, se presentan factores como cambio de material, performance de los operadores y traslados de los equipos de carguío.

Eficiencia del operador de camión. Los operadores nunca alcanzan el máximo rendimiento del equipo, distancias cortas de acarreo impiden que el camión desarrolle toda la velocidad posible del equipo, por lo contrario, las rutas largas permiten que el operador de camión utilice mejor el equipo debido a menor manipulación de las marchas.

Disponibilidad mecánica de la flota. Es el porcentaje de tiempo que un equipo está disponible para operar. Asimismo, en caso que un equipo presenta alguna restricción mecánica que impedirá que se consiga el mismo performance que alcanzaría un operador en condiciones óptimas del equipo.

Figura 5

Producción real y teórica del sistema pala-camión



Nota: Pando (2003)

En la figura 5, podemos observar que la curva A muestra el potencial del equipo de acarreo, y la curva C muestra la curva de acarreo por efecto de la eficiencia del operador. La curva B muestra el potencial del equipo de carguío y las curvas D y E muestra las curvas de carguío por efecto del mismatch - bunching y la disponibilidad mecánica del equipo. (Pando, 2003).

2.1.11 Fleet Match

Es la cantidad de equipos de acarreo que necesita la flota de carguío. Muchos autores consideran el Factor de Acoplamiento o Match Factor como la ecuación más representativa, en este caso se aplicará el mismo concepto con la diferencia que se asociará a la eficiencia de los equipos. Se definirán dos Fleet Match para diferenciar las situaciones de exceso de camiones y de déficit de camiones.

Fleet Match Overtruck (FM-over). En el caso que tenemos exceso de flota de acarreo, para optimizar la producción total se debe buscar optimizar el uso de los equipos

de carguío, disminuyendo al mínimo el hang, por tanto, el FM-over se define como el cociente de la eficiencia de carguío con la eficiencia de acarreo. (Pando, 2003).

$$FM - over = \frac{Eficiencia\ de\ carguío}{Eficiencia\ de\ acarreo} \quad (8)$$

Donde:

$$Eficiencia\ de\ acarreo = 100\% - Queue(\%) \quad (9)$$

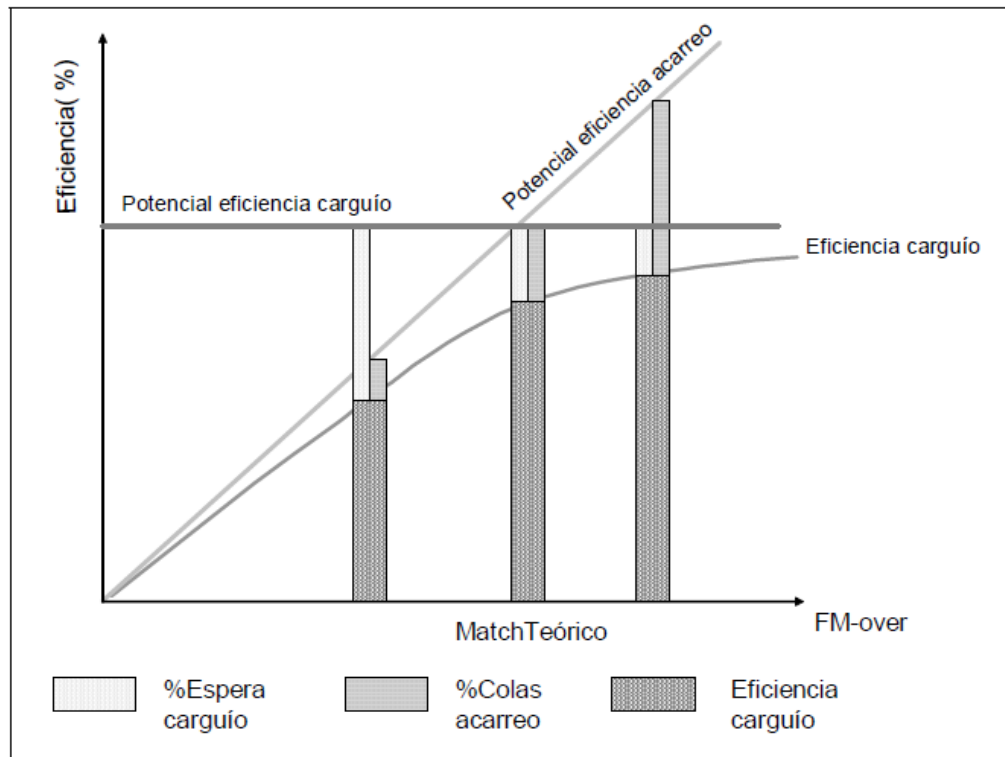
$$Eficiencia\ de\ carguío = 100\% - Hang(\%) \quad (10)$$

$$\%Colas\ de\ acarreo = Queue(\%) = \frac{Tiempo\ en\ cola}{Tiempo\ operativo\ del\ camión} \times 100\% \quad (11)$$

$$\%Esperas\ de\ carguío = Hang(\%) = \frac{Tiempo\ de\ espera\ de\ pala}{Tiempo\ operativo\ de\ pala} \times 100\% \quad (12)$$

Figura 6

Fleet Match Overtruck



Nota: Pando (2003)

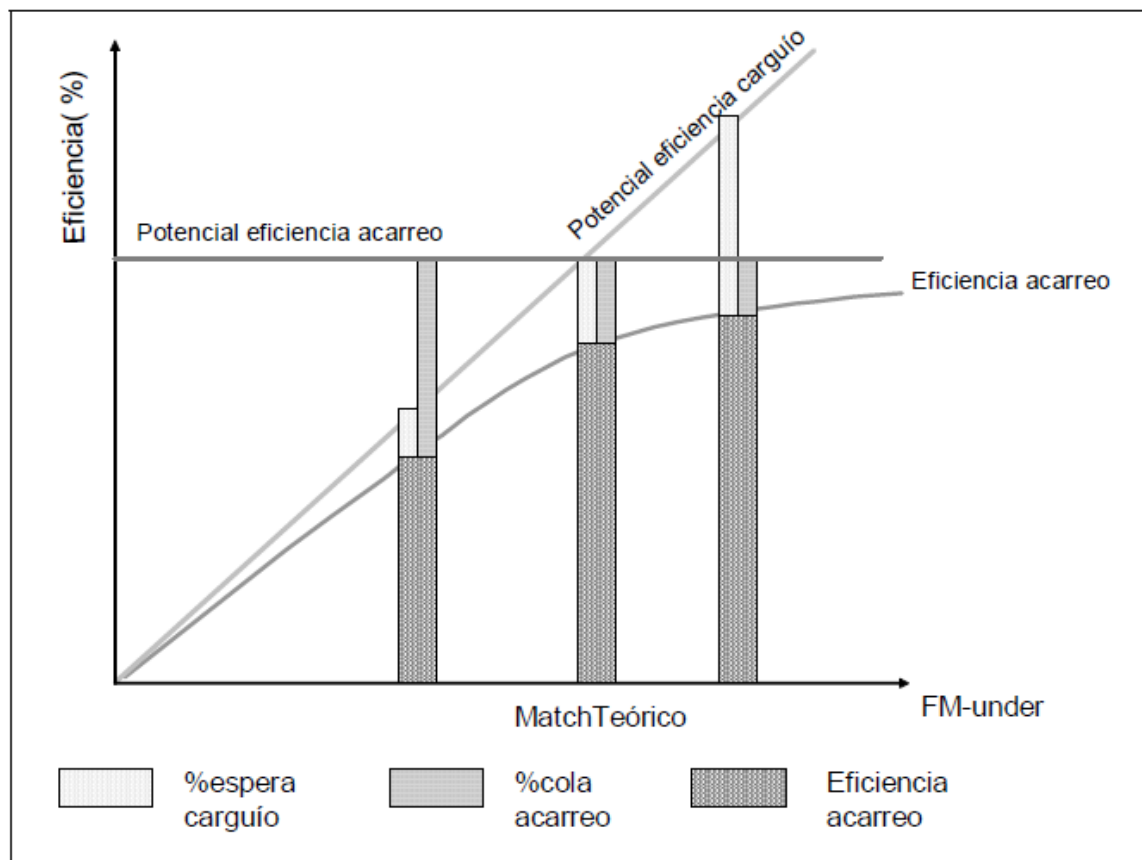
Según la figura 6 si graficamos el FM-over en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la eficiencia del equipo de carguío se obtendrá una curva que representa la producción del sistema. Además, si el FM-over aumenta, las esperas de carguío disminuirán, lo cual se busca para optimizar el equipo de carguío.

Fleet Match Undertruck (FM-under). En el caso de falta de equipo de acarreo, para optimizar la producción total se deberá optimizar el uso de los camiones disponibles, por lo que se debe disminuir al mínimo los tiempos de cola de camiones. El FM-under se definirá como el cociente entre la eficiencia de acarreo y la eficiencia de carguío. (Pando, 2003).

$$FM - under = \frac{\text{Eficiencia de acarreo}}{\text{Eficiencia de carguío}} \quad (13)$$

Figura 7

Fleet Match Undertruck



Nota: Pando (2003)

Según la figura 7 si graficamos el FM-under en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la eficiencia del equipo de acarreo se obtendrá una curva que representa la producción del sistema. Además, si el FM-under aumenta, por consecuencia las colas de acarreo disminuirán, lo cual se busca para optimizar la eficiencia de acarreo.

2.1.12 Costo unitario total de producción por tonelada

El costo unitario en minería se expresa normalmente en dólares por tonelada (\$/t) y represente el costo promedio por mover una tonelada de material. Para el caso del carguío y acarreo se calcula multiplicando los costos horarios de los equipos de carguío (CHC) y acarreo (CHA) por las horas de operación y divididos por las toneladas producidas (TP).

$$\text{Costo unitario total (CTT)} = \frac{\sum(\text{CHC} * \text{HC}) + \sum(\text{CHA} * \text{HA})}{\text{TP}} \quad (14)$$

Donde:

- CTT: Costo total de producción por tonelada
- CHC: Costo unitario total del equipo de carguío
- HC: Horas operativas del equipo de carguío
- CHA: Costo unitario total del equipo de acarreo
- HA: Horas operativas del equipo de acarreo
- TP: Toneladas totales producidas por las flotas

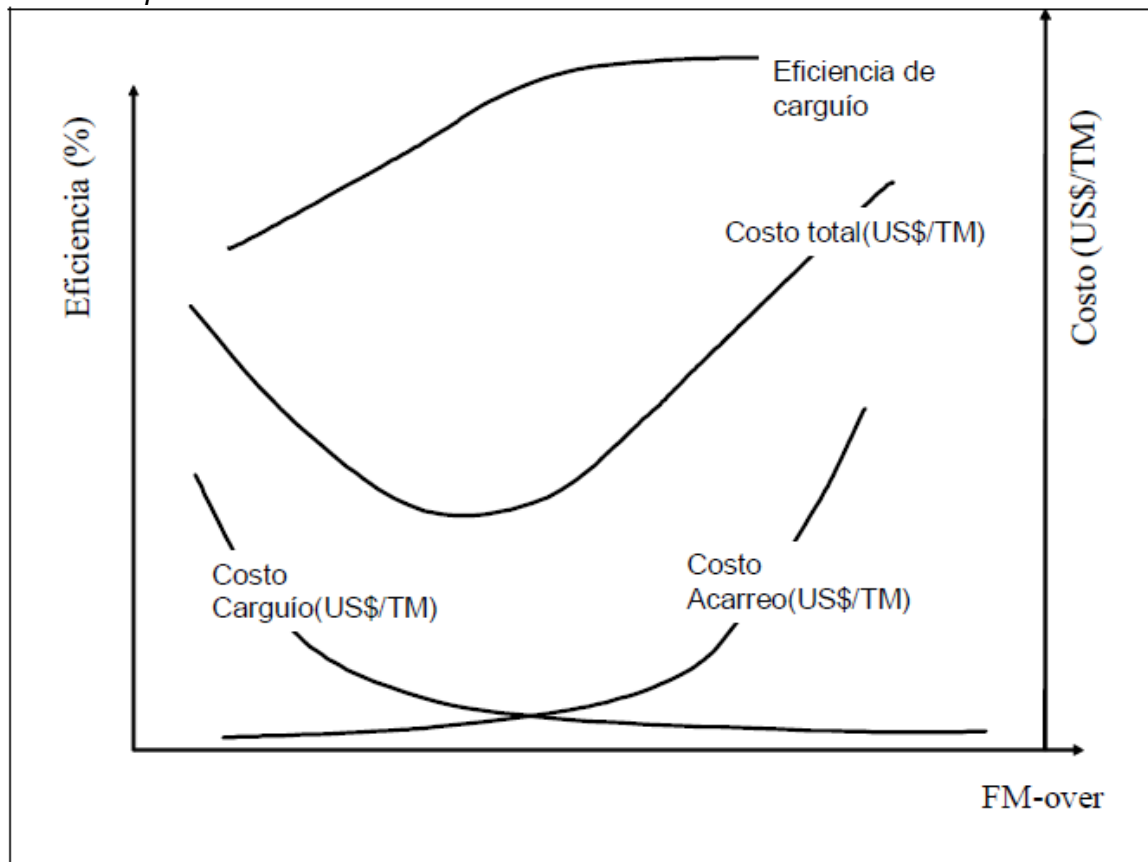
El costo unitario se ve afectado directamente por los tiempos improductivos. Un aumento del queue incrementa el costo unitario de acarreo y un aumento en el hang incrementa el costo unitario de carguío. En ambos casos, lo que ocasionará será un aumento en el costo unitario global. (Poblete, 2010).

Chavez (2023) en su estudio en minas polimetálicas peruanas identificó que la reducción de las demoras operativas logró disminuir en más de un 5% los costos unitarios, logrando además que mejore la productividad. Esto confirma que una optimización del queue y hang tiene un impacto directo en una mejora de costos como de productividad.

La representación gráfica de los costos totales por tonelada versus el Fleet Match (caso Overtruck) se puede visualizar en la figura 8. Caso similar se cumple para el caso Undertruck.

Figura 8

Costo total por tonelada vs FM-overtruck



Nota: Pando (2003)

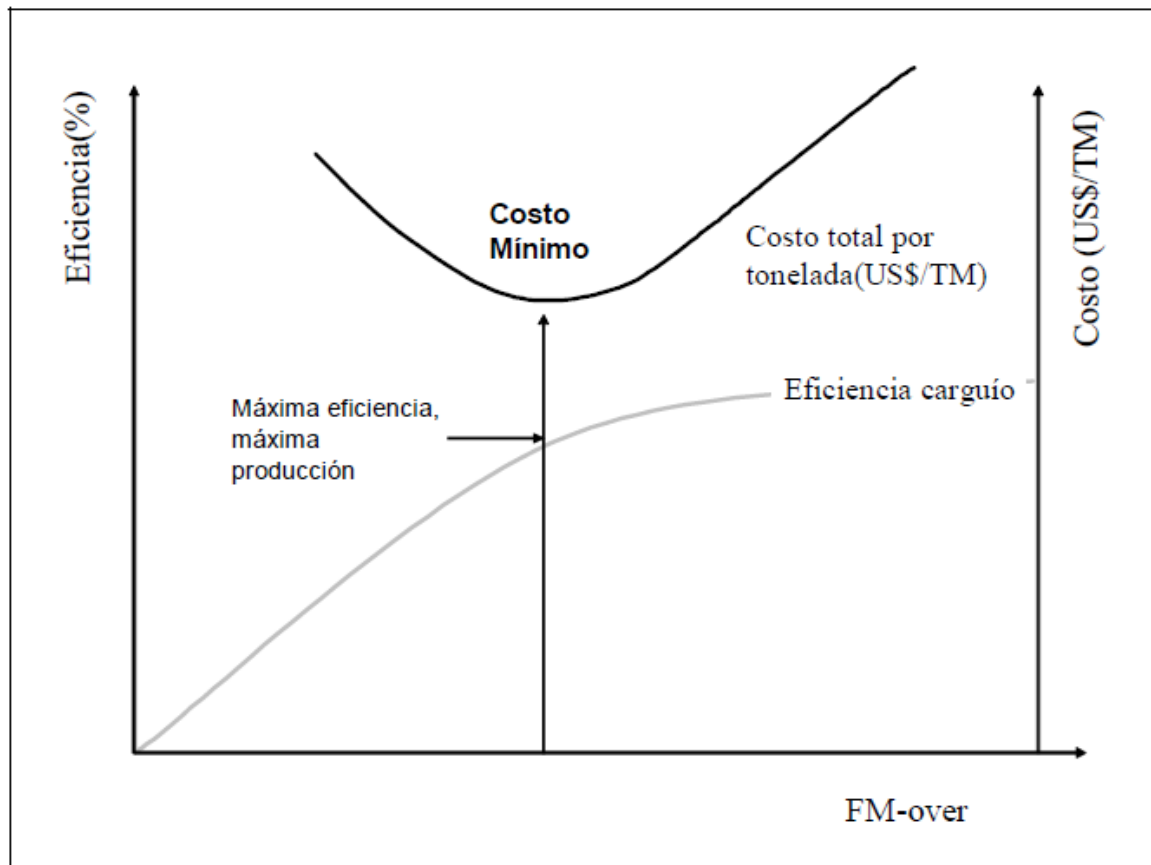
2.1.13 Criterios de evaluación para los rangos operativos de trabajo

Para el presente análisis se utilizarán los criterios: el criterio del costo mínimo, el criterio del sistema balanceado donde $MF=1$ y el criterio de máxima productividad de flotas, para los casos de exceso y déficit de camiones.

Criterio del Costo Mínimo. Para el mencionado criterio se buscará definir el valor del Fleet Match para el cual se logre producir la mayor cantidad de toneladas al menor costo de producción. Para ello, tal y cómo se observa en la figura 9, el valor del FM para el cual se obtiene el costo total por tonelada mínimo es el punto donde la curva del costo total alcanza su mínimo valor, la cual generará un punto de máxima eficiencia. (Pando, 2003).

Figura 9

Criterio del Costo mínimo



Nota: Pando (2003)

En términos de cálculos matemáticos, el punto para el cual la derivada de la curva total es cero, es el punto para el cual el costo total es mínimo. Y de las ecuaciones del FM-over, eficiencia de carguío y eficiencia de acarreo se puede obtener los valores de esperas de carguío y colas de acarreo asociadas al punto de costo mínimo.

Criterio del sistema balanceado (MF=1). Para el análisis del criterio de sistema balanceado, se considerará el valor del MF igual a 1 y haciendo uso de las fórmulas determinamos los porcentajes de esperas de carguío y colas de acarreo. Dichos valores de queue y hang son útiles para considerarlo como valores promedio de referencia para equilibrar la capacidad de carguío con la capacidad de acarreo disponible.

Criterio de la máxima productividad. Para el análisis del criterio de máxima productividad se realizará para los escenarios de exceso de camiones y déficit de camiones. Al estar en un escenario en que tenemos exceso de camiones buscaremos

optimizar la capacidad de carguío motivo por el cual debemos disminuir el hang de los equipos de carguío y aumentará el queue de camiones. Para el escenario de déficit de camiones se buscará optimizar el uso de los camiones motivo por el cual se buscará disminuir el tiempo de colas de acarreo y aumentará el hang en los equipos de carguío.

2.1.14 Uso de información histórica de la operación

Para poder definir los rangos de trabajo operativos de los indicadores de Queue y Hang se requerirá recolectar y procesar los datos históricos de los ciclos de camiones y palas a través de las consultas de la base de datos del FMS en funcionamiento. Para el tratamiento de esta información se utilizarán hojas de cálculo que permita obtener las curvas de eficiencia de carguío y acarreo, curva de costo total por tonelada y curvas de producción.

Una vez definido estos rangos de trabajo se pueden establecer objetivos que permita mantener controlado los indicadores Queue, Hang y optimizar recursos según requiera la necesidad de la operación. (Pando, 2003).

2.1.15 Fleet Management Systems (FMS)

Son herramientas tecnológicas que permiten monitorear, coordinar y optimizar los equipos mineros dentro de una operación. Estos sistemas recopilan la información en tiempo real desde los equipos y permiten:

- Mostrar la ubicación en tiempo real de camiones, equipo de carguío y flota auxiliar.
- Asignar de manera dinámica la flota de camiones a los equipos de carguío.
- Registrar indicadores de rendimiento de los equipos.
- Enviar mensajes directos a los operadores de equipos y mostrar mensajes de alerta.

Entre los FMS más utilizados en la industria minera se encuentran Modular Mining, Wenco, Hexagon, MineStar y Minesense for Miners (MS4M). La correcta implementación y uso del FMS permite tomar decisiones informadas, reducir tiempos improductivos y aumentar la productividad de las flotas.

2.1.16 Sistema de Gestión de Flota de Minesense for Miners (MS4M)

El análisis de este trabajo de investigación se realiza en una operación minera que utiliza el sistema de Gestión de Flota de la empresa Minesense for Miners (MS4M), el FMS en mención brinda su optimizador llamado ControlSense.

Funciones del optimizador ControlSense. El sistema ControlSense cuenta con un avanzado algoritmo de optimización del tipo N palas y M camiones, el cual se usa junto con la programación lineal. Estos algoritmos trabajan en conjunto proporcionando la ventaja de hacer simulaciones y proyectarse dos horas en el futuro, lo cual facilita la toma de decisiones para la asignación de los equipos (MS4M, 2022).

El optimizador maneja recauda la siguiente información para su proceso:

- Estado de los equipos (ready, delay, standby, Maint, Outofplan)
- Actividades
- Velocidades
- Productividades
- Tiempo de ciclo de los últimos viajes de equipos de carguío y acarreo
- Descargas habilitadas para el manejo del blending
- Restricciones de carga, descarga, vías
- Asignaciones fijas de camiones a equipos de carguío
- Mezclas de materiales

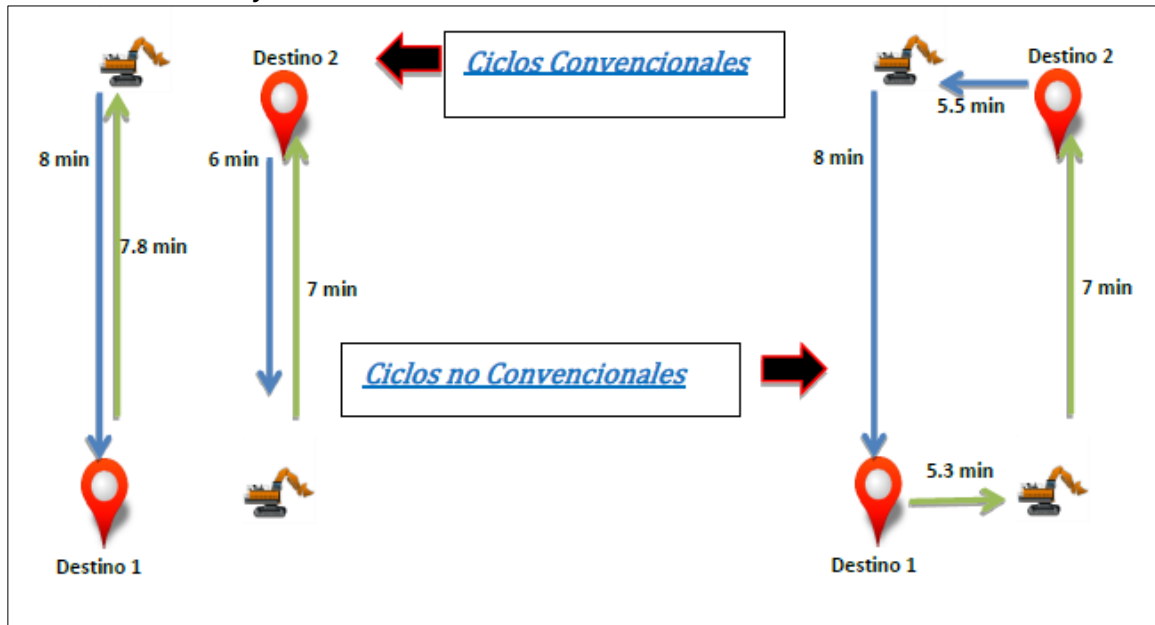
Con estos datos recopilados se construye un primer escenario de simulación. Luego se construyen diferentes escenarios de simulación con los datos anteriormente recopilados, obteniéndose múltiples posibilidades (NM donde M es el número de palas y N el número de camiones) y se escoge la opción que represente un menor costo operativo, considerando todos los parámetros configurados inicialmente.

El optimizador permite que se realice ciclos no convencionales, es decir, luego de la descarga puede dirigirse a otro equipo de carguío diferentes al que lo cargó previamente, al permitir la combinación de ciclos convencionales se logra realizar en conjunto más

viajes, produciendo más toneladas con los mismos recursos. La consecuencia de este proceso es la reducción de costos operativos (MS4M, 2022).

Figura 10

Ciclo convencional y no convencional



Nota: Manual de operación del sistema Control Sense (2018)

Cálculo de la mejor ruta. El sistema constantemente calcula la ruta más corta que debe transitar un equipo de acarreo para llegar a su destino (equipo de carguío o punto de descarga), este cálculo se realiza con los datos vigentes: rutas de acarreo vigentes, tiempo promedio de viaje de camiones en las rutas disponibles. Para definir esta mejor ruta se debe tener actualizado las vías de acarreo, tener habilitadas las descargas disponibles y los tipos de materiales que acepta, estos requisitos deberán ser programados previamente por el supervisor de despacho de flota para que el sistema calcule las mejores opciones disponibles con información vigente, optimizando los resultados.

Materiales Permitidos para la Descarga. El optimizador permite asignar distintos tipos de material a las descargas creadas, es responsabilidad del Supervisor de Despacho de Flota configurarlas y habilitarlas de tal manera que cada vez que un equipo de carguío cargue un camión con un material determinado pueda ser asignado de manera automática al destino de descarga que se encuentre más cerca y acepte el tipo de material que está acarreado el camión despachado.

Restricción de Parámetros. En el optimizador se cuenta también con las opciones: restringir el carguío de camiones en determinados equipos de carguío, restricciones de descarga, inhabilitar el carguío. De acuerdo a las necesidades operativas que puedan surgir.

Prioridades.

De Carguío. Se cuenta con tres niveles de prioridad (A, B y C), donde el nivel A es la más alta prioridad, el B es prioridad media y la C es prioridad baja; su configuración dependerá de los requerimientos de la operación.

De Descarga. Las descargas cuentan con tres niveles de prioridad. La primera es alta prioridad, cuando cuenta con un límite inferior (ton/h) de descarga y una mezcla que cumplir, la segunda cuando solo tiene un límite inferior, y el tercer nivel para asignar a descargas comunes, que podrían tener mezcla o no.

Asignaciones Fijas.

De carguío a una descarga. Sirve para asignarle a un equipo de carguío siempre la misma descarga, siempre y cuando el material minado lo permita, es útil cuando se tiene diferentes destinos para un mismo material, pero se requiere descargar en uno en específico sin importar si es la ruta más corta o no.

De equipo de acarreo a un equipo de carguío. El equipo de acarreo siempre será asignado al mismo equipo de carguío, es útil para casos en los que el equipo de acarreo tenga una restricción que le permita hacer ciclo dinámico en toda la mina.

Registro de Ciclos. Entre las funcionalidades principales del sistema de gestión de flota se encuentra el registro de ciclos de acarreo. Esta funcionalidad nos permite registrar los tiempos de cada actividad del camión, así como el tiempo de las actividades del equipo de carguío. Con esta información se pueden calcular los indicadores de productividad de acarreo, carguío.

Figura 11

Vista del formulario de Registro Ciclos

Registro Ciclos

Fecha Ini... 2018-07-15 Fecha Fin 2018-07-16 Cargar

ID	Turno-carga	Turno-Des...	Flota-Acarr...	Equipo-Ac...	Operador...	Locacion	Polígono	Nivel-Políg
1106145	A	A	793F	CM09	Cotrina Past...	F1-L2-4125	01-25-003-...	4125
1106141	A	A	793F	CM04	Escobedo Z...	F2-L1-4290	02-14-041-...	4290
1106149	A	A	793F	CM05	Cerna Mari...	F2-L1-4290	02-14-041-...	4290
1106146	A	A	793F	CM11	Silloca Cruz...	F1-L3-4125	01-25-014-...	4125
1106143	A	A	EH4000	CM21	Villena Ten...	F1-L3-4125	01-25-014-...	4125
1106147	A	A	793F	CM18	Huaraca Hu...	F1-L3-4125	01-25-014-...	4125
1106150	A	A	793F	CM08	Linares Mur...	F2-L1-4290	02-14-041-...	4290
1106152	A	A	793F	CM10	Morales Ro...	F1-L2-4125	01-25-003-...	4125
1106140	A	A	793F	CM06	Rojas Huam...	F1-L2-4125	01-25-003-...	4125
1106144	A	A	EH4000	CM20	Dominguez...	F1-L3-4125	01-25-014-...	4125
1106151	A	A	793F	CM13	Melo Malpa...	F2-L1-4290	02-14-041-...	4290
1106142	A	A	793F	CM02	Murga Huar...	F1-L2-4125	01-25-003-...	4125
1106154	A	A	793F-MU	CM19	Parra Rojas...	F2-L1-4290	02-14-041-...	4290

Nuevo Editar Eliminar Cancelar Actualizar Exportar

Nota: Manual de operación del sistema Control Sense (2018)

2.1.17 Modelo de tiempos de equipos

El modelo de tiempo nos determina la clasificación del uso de tiempo de los equipos, para la operación en análisis están distribuidos tal como se ve observa en la figura 12.

Tiempo calendario. Es el total de tiempo para el equipo, 24 horas al día, 7 días a la semana, los 365 día al año.

Tiempo Total Planeado. Es el tiempo que está programado que esté en la operación el equipo en mención.

Tiempo fuera de Plan. Es el tiempo que el equipo no estará disponible para la operación, por algún trabajo en específico o por no estar programado en el plan. No se registrará indicadores durante este periodo.

Tiempo Disponible. Es el tiempo que el equipo se encuentra apto para realizar trabajos operativos.

Tiempo fuera de servicio. Es el tiempo que el equipo no se encuentra disponible para realizar trabajos operativos por un mantenimiento correctivo o programado.

Tiempo operativo. Es el tiempo que el equipo está realizando trabajos productivos.

Tiempo en demora. Es el tiempo que el equipo está disponible para operaciones, pero se encuentra detenido por retrasos o demoras necesarios en la operación donde se tiene un tiempo estimado de duración.

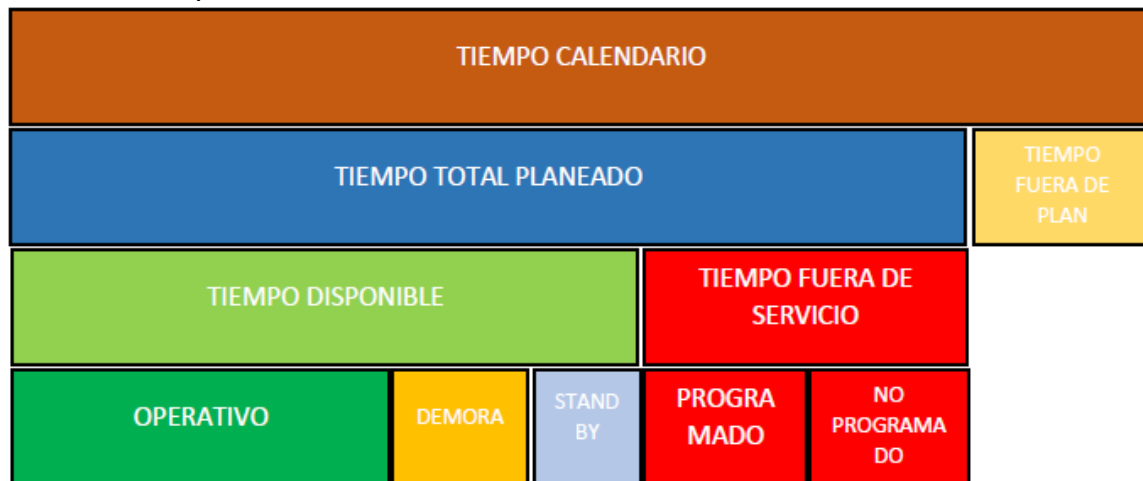
Tiempo en standby. Es el tiempo que el equipo está disponible para operaciones, pero se encuentra detenido y con motor apagado por retrasos o demoras inesperadas en la operación y no se tiene un tiempo estimado de duración.

Tiempo programado. Es el tiempo en el que el equipo no está disponible por trabajos programados de mantenimiento.

Tiempo no programado. Es el tiempo en el que el equipo no está disponible por defectos o fallas imprevistos y se encuentra a cargo del área de mantenimiento para su atención.

Figura 12

Modelo de tiempos



Nota: Elaboración propia

2.1.18 Parámetros de desempeño de los equipos

Disponibilidad física. Es el porcentaje de tiempo que el equipo se encuentra disponible para operaciones.

$$\text{Disponibilidad Física} = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Total Planeado}} \times 100\% \quad (15)$$

Uso de la disponibilidad. Representa el porcentaje de tiempo que el equipo está disponible para operaciones y está realizando un trabajo productivo y/o detenido por demoras del proceso. Se ve afectado por los standby así que se considera también para visualizar cómo se gestiona los standby en la operación.

$$\text{Uso de la disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo operativo} + \text{Tiempo en demora}}{\text{Tiempo Disponible}} \times 100\% \quad (16)$$

Uso. Representa el tiempo que el equipo está realizando trabajos operativos con respecto al tiempo que el equipo se encuentra con el motor encendido. Se ve afectado directamente por las demoras operativas, por lo que es un indicador para visualizar que tan bien se gestionan las demoras en la operación.

$$\text{Uso} = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo operativo} + \text{Tiempo en demora}} \times 100\% \quad (17)$$

Usage (Uso de Disponibilidad). Es la medida del tiempo que el equipo se encuentra haciendo trabajo netamente operativo con respecto al tiempo disponible. Se ve afectado por las demoras y standby.

$$\text{Usage} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Disponible}} \times 100\% \quad (18)$$

Utilización. Es el porcentaje del tiempo total planeado que el equipo se encuentra realizando trabajo productivo.

$$\text{Utilización} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Total Planeado}} \times 100\% \quad (19)$$

2.2 Marco Conceptual

- Queue (cola de camiones), es el tiempo que los camiones permanecen en cola a la espera de ser cargados por un equipo de carguío. Es un tiempo improductivo asociado a una sobreasignación de camiones a un equipo de carguío. Según Castillo (2014), cuando el queue aumenta por encima de rangos óptimos, se genera congestión en los frentes de trabajo, disminuyendo la eficiencia de los camiones y aumentando los costos unitarios.

Para el trabajo de investigación utilizaremos la información de los ciclos de acarreo para que a partir del valor de queue asignado al ciclo, determinemos el Queue (%) que viene a ser el tiempo que representa la actividad de Queue con respecto al tiempo total del ciclo de acarreo, tal como se observa en la Ecuación 3. Es uno de los cálculos principales para el análisis y determinación de los rangos operativos de trabajos dado que mientras mayor sea el Queue, menor será la eficiencia de acarreo.

- Hang (tiempo de espera de pala), es el tiempo inactivo que permanece la pala por falta de camiones para cargar, a diferencia del queue, este indicador está asociado a un déficit de camiones, donde la capacidad de acarreo no es suficiente para la cobertura de la capacidad de carguío de la pala. Sepúlveda (1995), explica que el hang es un indicador crítico por las palas son los equipos de mayor costo de capital en la operación minera. Por tanto, un aumento del hang repercute en una disminución de la productividad del sistema y en un incremento de los costos de carguío.

Para el trabajo de investigación determinemos a partir del registro de ciclos el Hang (%) que viene a ser el tiempo que representa la actividad de Hang con respecto al tiempo total del ciclo de carguío, tal como se observa en la Ecuación 4. Es uno de los cálculos principales para el análisis y determinación de los rangos operativos de trabajos dado que mientras mayor sea el Hang, menor será la eficiencia de carguío.

- Eficiencia de carguío y acarreo: Son métricas derivadas de los indicadores queue y hang. Permiten medir el grado de utilización efectiva de cada tipo de equipo y dependen directamente de los tiempos improductivos queue y hang, tal como muestra las Ecuaciones 9 y 10.

De acuerdo con Pando (2003), estas eficiencias son requeridas para calcular el Match Factor. A partir de los valores registrados de queue y hang del registro de ciclos de acarreo en porcentaje se determinará el valor de las eficiencias de las

flotas y se obtendrá las curvas de eficiencias de carguío y acarreo tal como las Figuras 6 y 7.

- Costo unitario: Es el indicador económico que mide el costo promedio de mover una tonelada de material. Para el caso de estudio se considerarán los valores costo horario de pala y camión a partir de los resultados históricos del costo horario de los equipos en la operación según reporte de costos.
- Match Factor (MF): Es el indicador que expresa el equilibrio entre las eficiencias de acarreo y carguío. Sirve para determinar si la relación entre palas y camiones está balanceada (Sepúlveda, 1995).

A partir de las ecuaciones de eficiencias de carguío y acarreo se aplicará los criterios de análisis para determinar los rangos operativos de los indicadores queue y hang, para ello se le aplicará los criterios del costo mínimo, máxima productividad y de sistema balanceado. A partir de la aplicación de los criterios se obtendrá los Match Factor para los escenarios de exceso y déficit de camiones y con la ecuación del Match Factor podemos determinar los valores de Queue y Hang necesarios.

- Productividad: Representa la cantidad de toneladas movidas por unidad de tiempo. Se calcula para equipos de carguío y acarreo tal como se muestra en las Ecuaciones 5 y 6.

Para el presente análisis se calcularán las productividades de carguío y acarreo para los ciclos registrados en el sistema de gestión de flota y de esa manera se obtendrá las curvas características para las productividades de carguío y acarreo.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Descripción del proyecto

La operación en análisis se encuentra ubicada en el desierto costero de la Región Ica, Provincia de Nasca, a 500 kilómetros al sur de Lima, a 35 kilómetros del distrito de San Juan de Marcona y a 12 kilómetros de la Panamericana sur, comprende un área aproximada de 3,969 hectáreas en una zona desértica (Marcobre 2024c).

Según el Reporte de Sostenibilidad 2024 de Marcobre, el proyecto consta de dos tipos de recursos: una capa superficial de óxidos de cobre y un cuerpo profundo de sulfuros de cobre. Los productos finales de la operación son los cátodos de cobre de alta pureza y el concentrado de cobre. Su transporte es vía terrestre hacia los puertos de Callao y Matarani respectivamente con fines de exportación (Marcobre 2024b).

Figura 13

Ruta de llegada a la operación minera Mina Justa



Nota: Memoria Anual 2023 Marcobre.

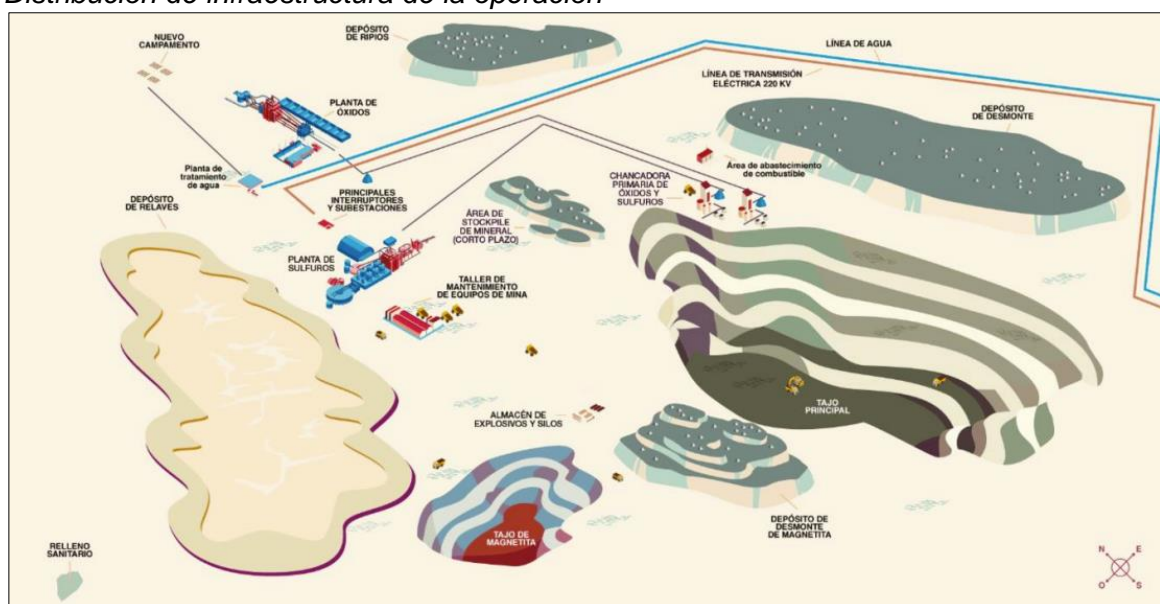
3.2 Características Operativas

Según Marcobre (2024a), la operación Mina Justa cuenta con un yacimiento de cobre para explotación a tajo abierto con una vida útil de 16 años de operación, dividido en 11 fases de explotación, destaca por presentar una topografía plana, caso poco habitual en grandes operaciones mineras. Carece de presencia de acuíferos en la zona de operaciones, lo que evita la afectación de aguas subterráneas. Se diferencia de otras operaciones ya que recicla el 100% del agua reutilizada, logrando cero vertimientos.

Cuenta con dos plantas para el procesamiento de mineral: Planta de sulfuros y Planta de óxidos. De ellas se obtiene como producto final el concentrado de cobre y cátodos de cobre de alta pureza respectivamente. La planta de sulfuros tiene una capacidad de procesamiento de 7 millones de toneladas al año y la planta de óxidos tiene una capacidad de procesamiento de 12 millones de toneladas al año. La planta de óxidos representa una apuesta por la innovación al contar con las bateas de lixiviación más grandes y donde se realiza la lixiviación más rápida del mundo. Asimismo, cuenta con la primera máquina robótica despegadora de cátodos de cobre totalmente robotizada en todo Sudamérica (Marcobre, 2024a).

Figura 14

Distribución de infraestructura de la operación



Nota: Memoria Anual 2023 Marcobre.

3.3 Resultados de desempeño de la operación

Durante el año 2023, se movió un total de 101 millones de toneladas de material. El material minado fue de 84.7 millones de toneladas, de los cuales 67.3 millones de toneladas fueron de desmonte, 6.2 millones de mineral sulfuro con una ley de 2.03% y 11.2 millones de mineral de óxidos con un 0.38% de CuAs (cobre soluble), con un 3.9 de ratio de desbroce.

Se desarrollaron las fases 2,3,4 y 9 durante este periodo distribuidos de la siguiente manera: fase 2 con un total de 6.4 millones de toneladas desde el nivel 524 hasta el 464; fase 3 con un total de 52.6 millones de toneladas desde el nivel 692 hasta el 584; fase 4 con un total de 23.8 millones de toneladas desde el nivel 800 hasta el 740 y la fase 9 un total de 1.8 millones de toneladas solo el nivel 788. Se alimentó a la planta de sulfuros un total de 6.3 millones de toneladas con un 1.85% de CuT y a la planta de óxidos un total de 9.6 millones de toneladas con un 0.57% de CuAs.

En cuanto a planta de sulfuros, se logró una recuperación de 92.5% de CuT, produciendo 293 mil toneladas de concentrado filtrado. El contenido de finos de cobre fue de 107,922 toneladas métricas finas y 3,666 miles de onzas de plata.

En planta de óxidos se logró una recuperación de 72.2% de CuAs. La producción de cátodos fue de 39,314 toneladas métricas finas (Marcobre, 2023).

Tabla 2

Resumen de indicadores de producción desde 2021-2023

Indicador	Unidades	2023	2022	2021
Producción total movimiento de Mina	kt	101,046	98,211	79,916
Mineral y sulfuros	kt	6,152	9,464	10,834
Ley CuT	%	2.03	1.18	1.54
Mineral óxidos	kt	11,237	13,315	13,368
Ley CuAS	%	0.38	0.33	0.39
Desmonte	kt	67,270	61,678	48,863
Ratio de desbroce (D/M)	#	3.9	2.7	2.0
Remanejo	kt	16,387	13,753	6,851
Total, ripios	kt	10,833	7,909	3,372
Total, alimentación a plantas	kt	15,879	13,811	7,367
Alimentación a planta sulfuros	kt	6,305	6,672	4,225
% Ley CuT	%	1.85	1.61	2.06

Alimentación a planta óxidos	kt	9,574	7,139	3,142
% Ley CuAS	%	0.57	0.59	0.63
Total, producción de cobre	tmf	147,237	125,448	85,102
Cobre en concentrado	tmf	107,922	96,408	75,000
Cobre en cátodos	tmf	39,314	29,040	10,102

Nota: Información obtenida de la Memoria Anual 2023 - Marcobre

Analizando la tabla 2, se visualiza que, desde el inicio de producción de Mina Justa en el año 2021, el crecimiento en el movimiento total de mina ha sido sostenido, pasando desde las 79,916 kt en 2021 hasta las 101,046 kt en el año 2023. De igual manera, la alimentación a las plantas de óxidos y sulfuros ha ido creciendo; en planta de sulfuros se registró un menor tonelaje con respecto al 2022 (6,305 kt vs 6,672 kt) pero a cambio se alimentó un mayor porcentaje de ley de CuT (1.85% vs 1.61%) logrando que se mantenga el crecimiento sostenido en la producción de cobre en concentrado con respecto al año anterior; en planta de óxidos también se logró un nuevo récord de producción durante el ramp up de tonelaje procesado.

A nivel de mina, la ratio de desbroce Desmonte/Mineral pasó de 2.0 en 2021 a 3.9 en 2023, lo que evidencia que en los años siguientes se requerirá mover mayores volúmenes de desmonte para acceder al mineral debido a la profundización de las fases de explotación.

Si bien los indicadores de los primeros 3 años de la operación evidencian resultados positivos, se identifican nuevos cuellos de botella. La disminución de la producción de mineral sulfuro y el aumento del ratio Desbroce/Mineral indican un mayor esfuerzo para acceder al mineral lo que a futuro exigirá una mejora de la eficiencia operativa para no comprometer los costos. Ante este panorama se requieren implementar medidas que fomenten la mejora de los procesos en mina e iniciativas que busquen optimizar el uso de los activos de la operación como las flotas de carguío y acarreo serán vitales. Ante este escenario, se justifica la implementación de rangos operativos para indicadores claves en el Fleet Match como el queue y hang para optimizar los ciclos de carguío y acarreo.

3.4 Estudio de la situación actual

Ante la necesidad de optimizar los procesos de la operación para cumplir los planes de producción en la operación Mina Justa, se establecieron inicialmente objetivos para los indicadores de carguío y acarreo a partir de la experiencia en operaciones similares en otras minas del Perú. Se estableció que los targets para los indicadores queue y hang serían de 1.7 minutos y 0.4 minutos por ciclo respectivamente.

Durante el año 2023, se establecieron objetivos a nivel de gerencia de buscar optimizar los procesos a través de iniciativas que ayuden a lograr las metas establecidas en el presupuesto del año. A través del área de Despacho Mina se buscó revisar los indicadores clave que afectan la productividad y costos en los ciclos de carguío y acarreo para lo cual se accedió a la información histórica del año 2023 hasta el mes de setiembre.

Tabla 3

Indicadores del ciclo de carguío en Palas enero-setiembre 2023

Equipo de carguío	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre
Pala 01									
Tiempo Spot (min)	1.03	1.08	1.12	1.09	1.08	0.99	0.98	0.98	0.97
Tiempo Hang (min)	0.41	0.36	0.41	0.34	0.33	0.27	0.26	0.35	0.39
Tiempo cargando (min)	2.46	2.54	2.67	2.69	2.79	2.77	2.70	2.56	2.70
Tiempo de ciclo carguío (min)	3.89	3.99	4.20	4.13	4.20	4.03	3.95	3.89	4.07
Pala 02									
Tiempo Spot (min)	1.08	1.05	1.03	1.08	1.00	1.05	1.00	1.01	0.96
Tiempo Hang (min)	0.41	0.40	0.43	0.37	0.42	0.27	0.35	0.35	0.32
Tiempo cargando (min)	2.36	2.41	2.36	2.58	2.43	2.52	2.59	2.66	2.63
Tiempo de ciclo carguío (min)	3.84	3.86	3.83	4.04	3.85	3.85	3.94	4.02	3.91
Pala 03									
Tiempo Spot (min)	1.33	1.13	1.17	1.12	1.08	1.01	1.03	0.95	0.92
Tiempo Hang (min)	1.24	1.35	1.25	1.29	0.43	0.25	0.33	0.23	0.26
Tiempo cargando (min)	2.32	2.24	2.20	2.46	2.52	2.39	2.45	2.44	2.54
Tiempo de ciclo carguío (min)	4.89	4.72	4.61	4.86	4.03	3.65	3.81	3.62	3.72

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 3, durante los meses resaltados en color rojo se observa que el valor del Hang está por encima del target de 0.4 minutos, donde las palas 1 y 2 se encontraron

minando en fase 3 desde el nivel 692 en enero hasta el nivel 596 a fines de diciembre, en el caso de la pala 3 se visualiza altos valores de hang desde el mes de enero hasta mayo, su minado empezó en fase 2 desde el nivel 500 hasta finalizar en el mes de abril en el nivel 488 para luego iniciar traslado hacia la fase 4 a minar en el nivel 800.

Tabla 4

Indicadores de acarreo por equipo de carguío enero-setiembre 2023

Acarreo en mina	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre
Pala 01									
Tiempo ciclo acarreo (min)	25.4	25.5	26.3	27.1	27.0	26.3	26.6	26.2	27.1
Promedio de EFH Vacío (Km)	5.05	4.92	4.98	5.10	4.97	4.63	4.54	3.97	4.11
Promedio de EFH Cargado (Km)	4.56	4.55	4.31	4.96	4.94	4.94	5.24	5.55	5.66
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	556	552	535	520	523	536	530	538	521
Queue (min)	1.79	2.27	2.60	2.45	2.43	2.46	2.38	1.67	1.81
Tiempo Acarreando	9.1	9.1	9.1	9.9	9.9	9.9	10.5	11.4	11.7
Pala 02									
Tiempo ciclo acarreo (min)	22.6	23.9	23.7	25.0	24.8	26.4	25.9	25.8	27.1
Promedio de EFH Vacío (Km)	4.17	4.54	4.28	4.48	4.50	4.65	4.41	3.90	4.08
Promedio de EFH Cargado (Km)	3.90	4.27	4.14	4.59	4.86	5.03	5.31	5.32	5.57
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	623	590	594	563	568	534	544	546	520
Queue (min)	1.62	1.88	2.04	2.17	1.70	2.51	1.86	1.62	1.93
Tiempo Acarreando	7.8	8.5	8.7	9.2	9.7	10.1	10.6	10.9	11.5
Pala 03									
Tiempo ciclo acarreo (min)	32.5	33.8	35.0	29.8	20.7	21.7	21.1	20.4	20.2
Promedio de EFH Vacío (Km)	5.15	5.32	5.48	5.06	3.91	4.10	4.13	3.72	3.58
Promedio de EFH Cargado (Km)	8.54	9.20	9.23	7.11	3.24	3.51	3.25	2.88	2.79
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	434	417	403	473	681	651	668	690	697
Queue (min)	1.17	1.11	1.27	1.46	1.77	2.01	1.95	1.98	1.94
Tiempo Acarreando	17.1	18.4	19.1	14.2	6.5	7.0	6.5	6.0	5.8

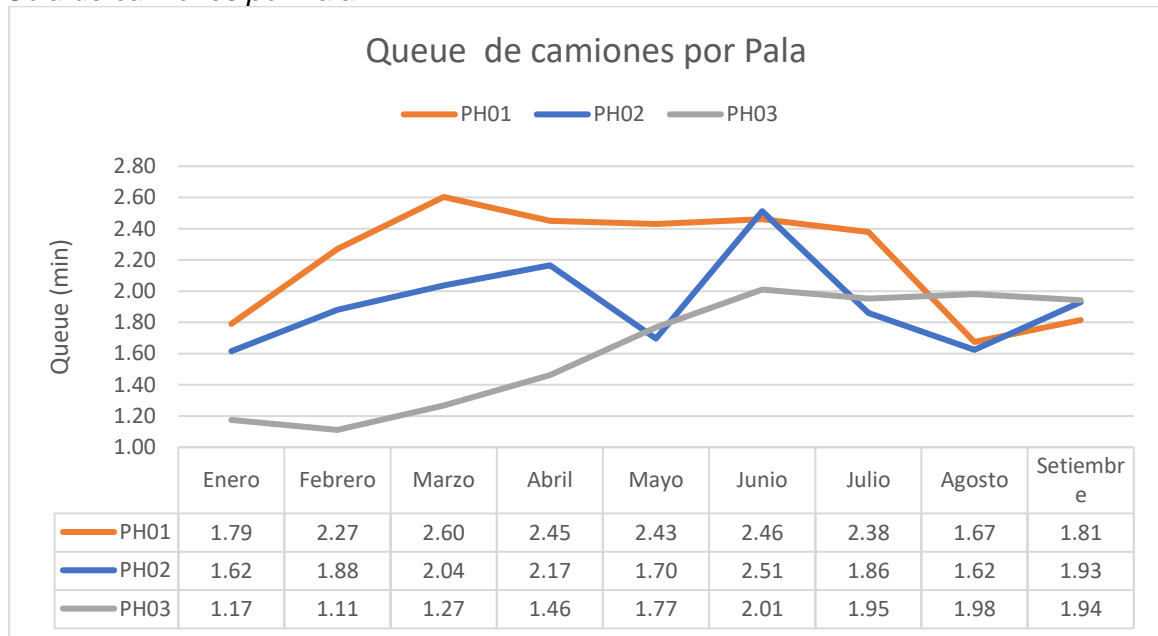
Nota: Elaboración propia.

Según la tabla 4, se visualiza sombreado en rojo los meses en los que el indicador de Queue estuvo por encima del target 1.7 minutos, donde para las palas 1 y 2 se tiene un indicador de cola de camiones elevado casi durante todo el año y para la pala 3 se

evidencia que desde el traslado a fase 4 el indicador se ha elevado por encima del valor objetivo.

Figura 15

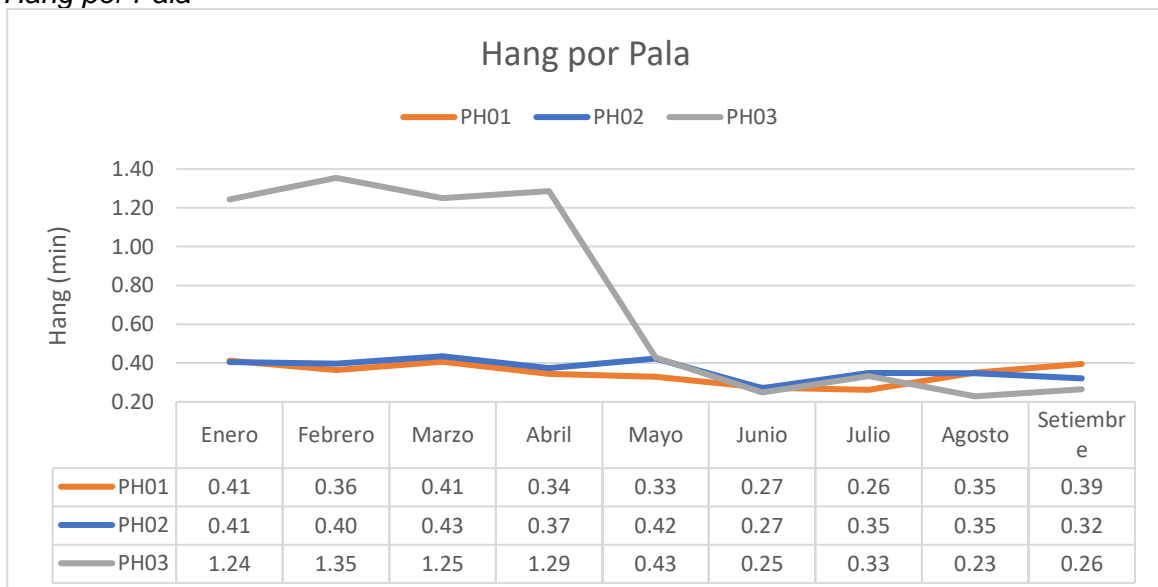
Cola de camiones por Pala



Nota: Elaboración propia

Figura 16

Hang por Pala



Nota: Elaboración propia

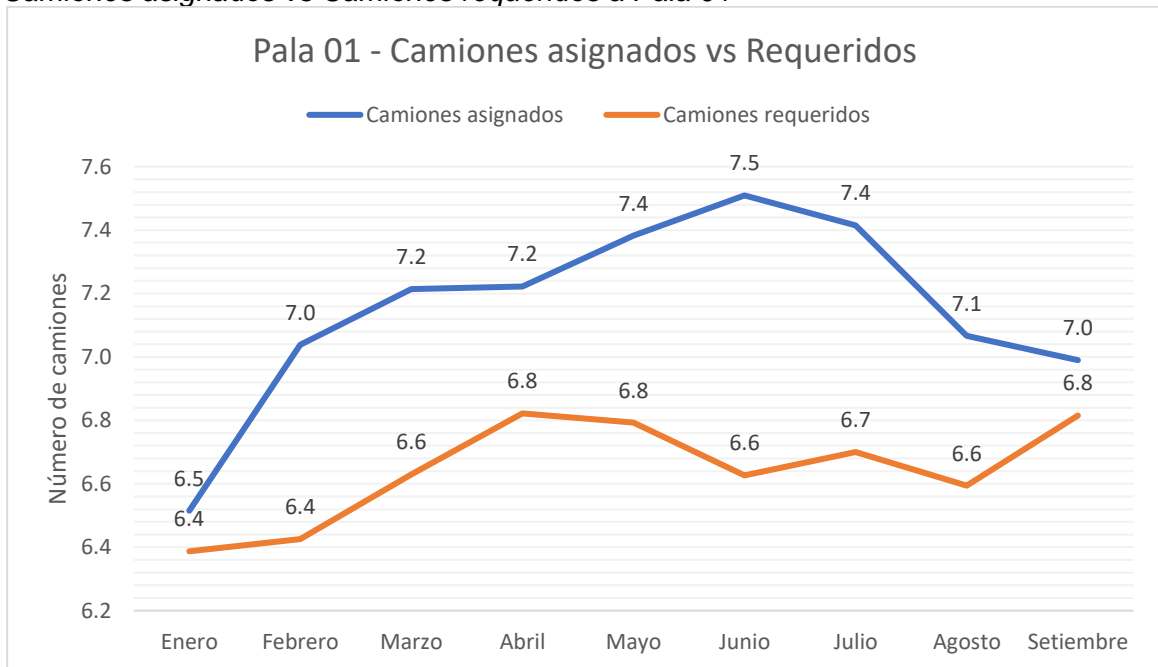
Revisando las figuras 15 y 16, llegamos a visualizar que hay meses en los que se presenta valores elevados de cola de camiones y valores elevados de tiempo de espera de pala por camiones (target de queue es 1.7 minutos y de hang es 0.4 minutos), dos

indicadores que en condiciones normales son antagónicos: donde hay valores elevados de cola de camiones el tiempo de espera de pala por equipo de acarreo es bajo y en viceversa. Lo que permitió suponer que la asignación de los camiones a los equipos de carguío no estaba siendo la más adecuada posible.

Por tal motivo se analizó la distribución de camiones asignados a palas comparado con los camiones requeridos durante el periodo enero a setiembre 2023, de igual manera las productividades de carguío.

Figura 17

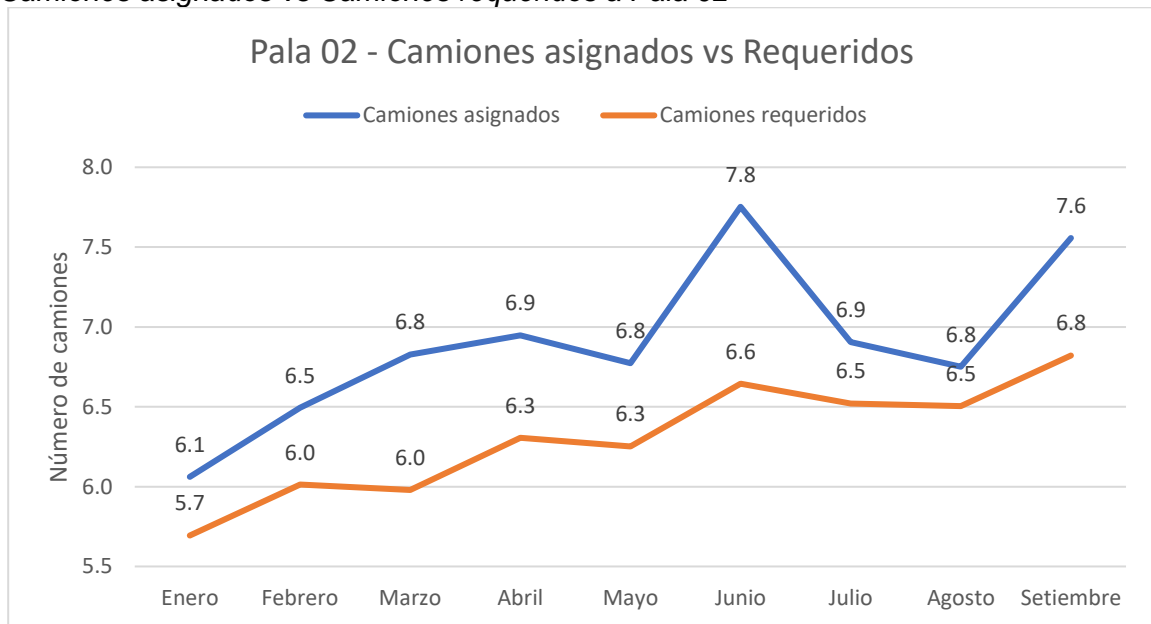
Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 01



Nota: Elaboración propia

Figura 18

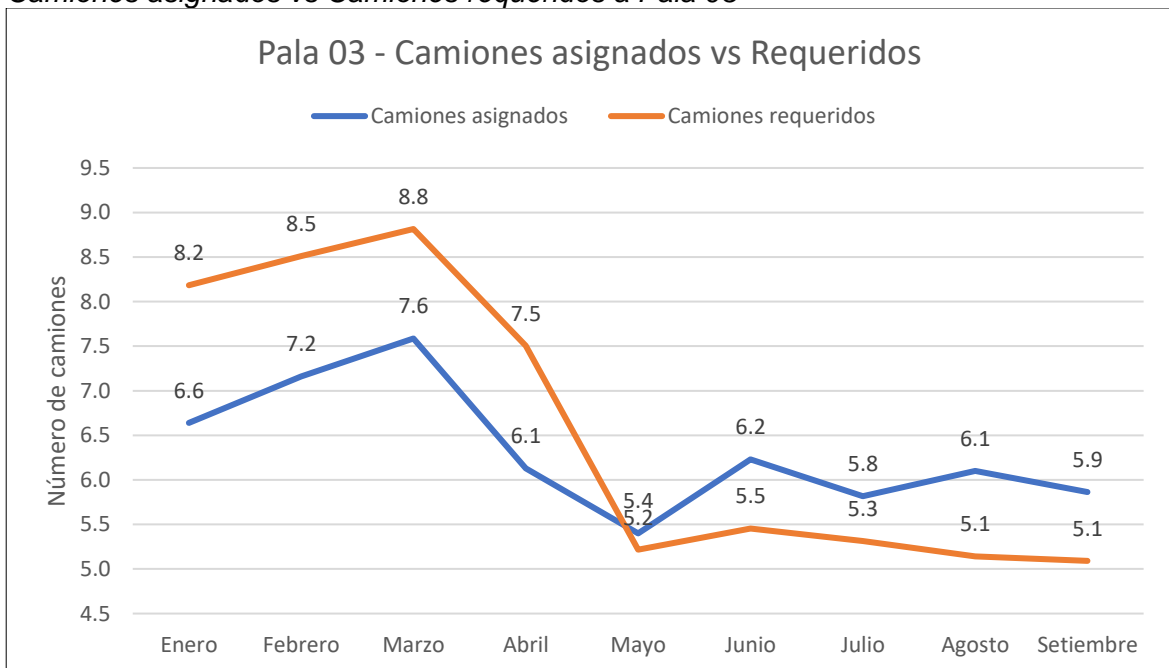
Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 02



Nota: Elaboración propia

Figura 19

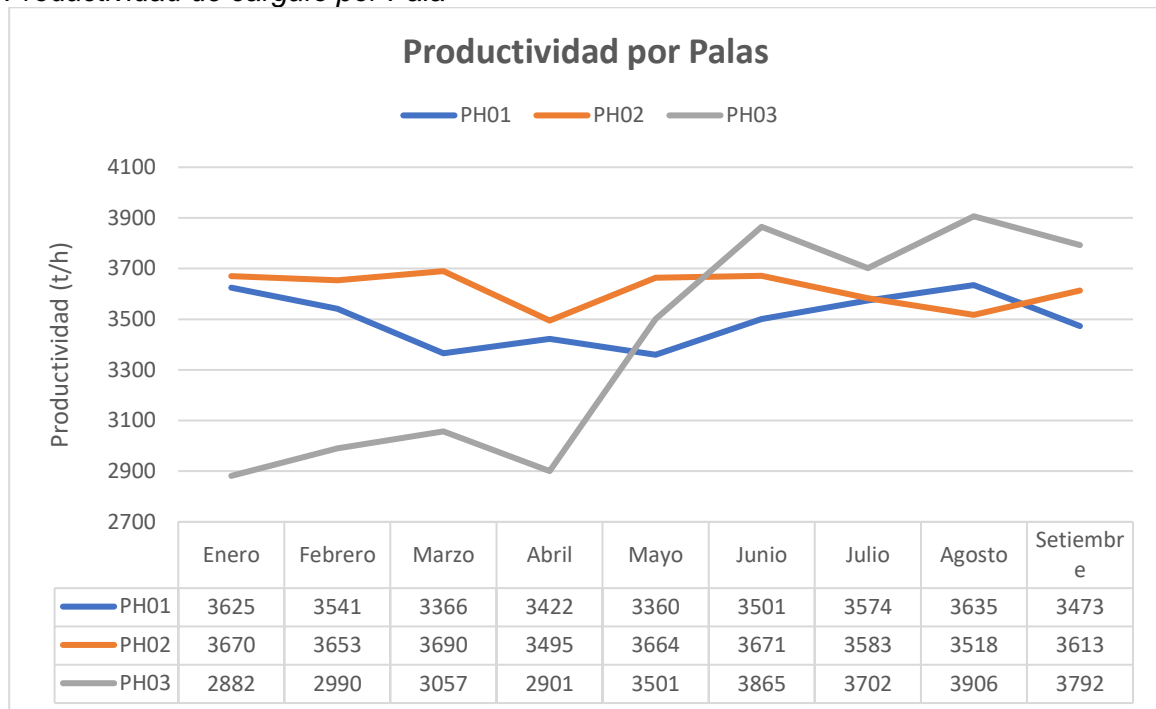
Camiones asignados vs Camiones requeridos a Pala 03



Nota: Elaboración propia

Figura 20

Productividad de carguío por Pala



Nota: Elaboración propia

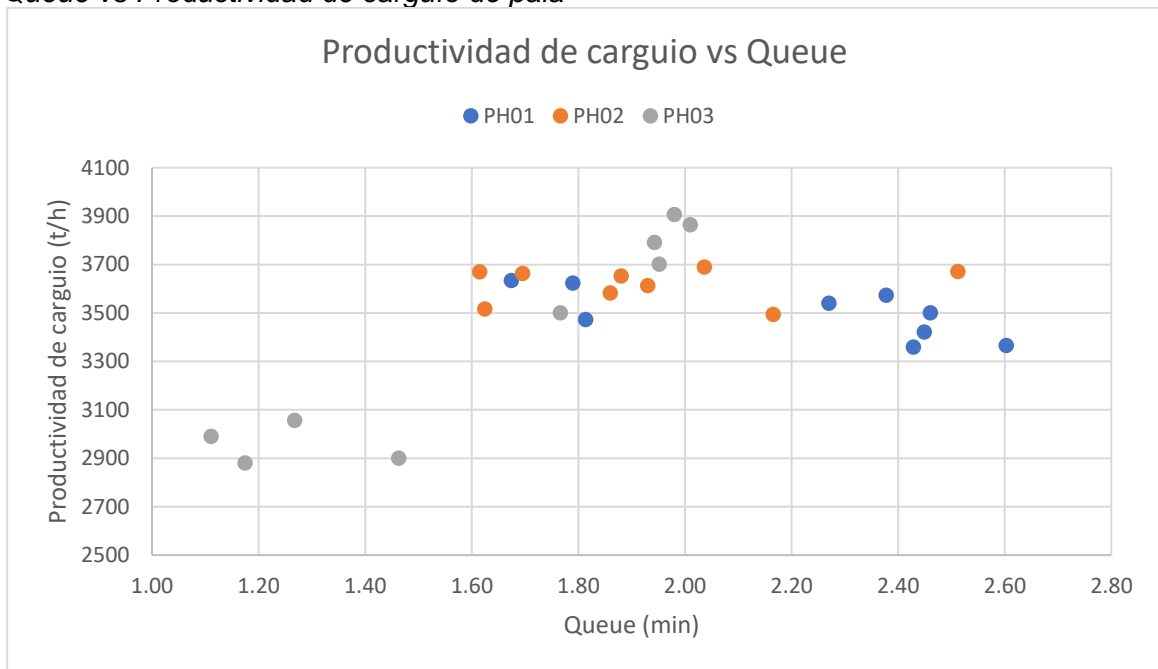
En la Figura 17 se visualiza que la Pala 01 cuenta con una asignación constante de camiones por encima del requerimiento operativo, lo que genera un exceso de flota de acarreo, aumentando el tiempo queue y disminuyendo la eficiencia de acarreo. Según la Figura 18 también se evidencia una sobreasignación de camiones reflejado en el queue y por momento se evidencia también una subasignación temporal lo que provoca que se eleve el hang según la Figura 16. Según la Figura 19, se evidencia una asignación sistemática por debajo del requerimiento para la Pala 3 durante los meses de enero a abril, afectando la productividad de carguío en el mismo período estando muy por debajo del target de 3550 ton/h; de mayo a setiembre se evidencia una sobreasignación de camiones, reflejando en valores elevados de queue.

La sobreasignación de camiones en pala 1 durante el periodo de enero a abril 2023 pudo manejarse mejor distribuyendo el exceso de flota a frentes de carguío con subasignación de camiones como el de la pala 3, logrando reducir el alto tiempo hang en el frente de carguío. La pala 2 también presentó sobreasignación de camiones, pero a la vez por momentos presentó altos valores de tiempo hang lo que evidencia que no se logró

alcanzar un match efectivo pues en momentos presentó alta cola de camiones y en otros momentos, falta de camiones para el equipo de carguío. Se bajó la prioridad del minado con la pala 3 durante los meses de enero a abril 2023, condicionado por la ruta larga de acarreo al estar en la fase 2, fase más profunda, pero no se aprovechó todo lo posible el exceso de camiones en fase 3.

Figura 21

Queue vs Productividad de carguío de pala

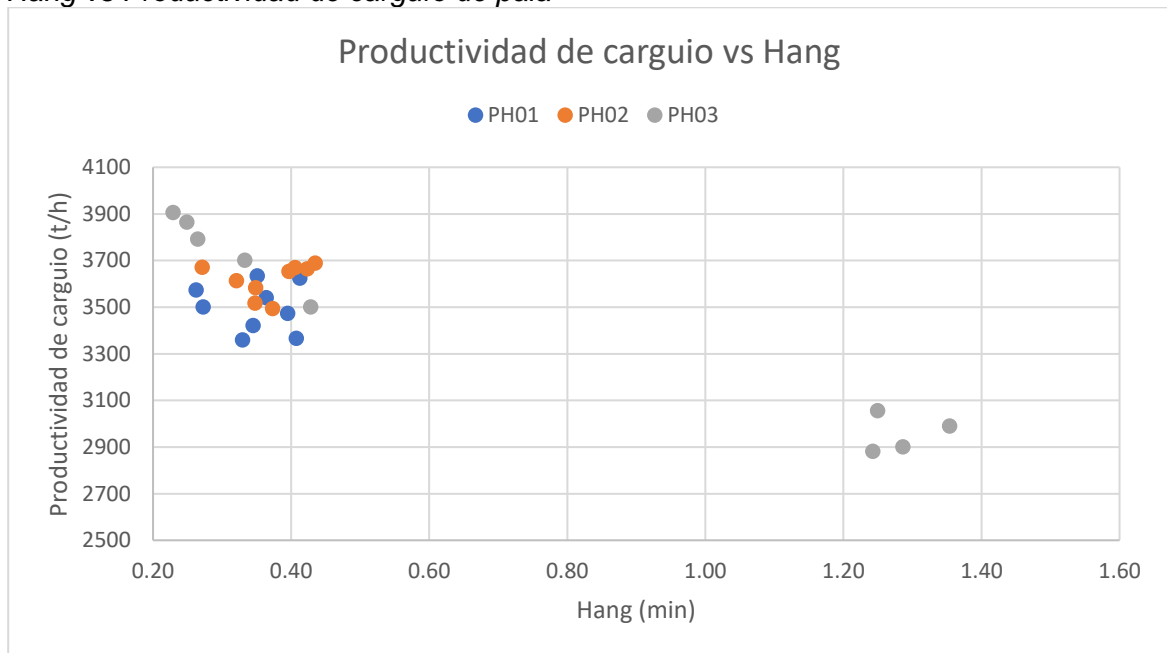


Nota: Elaboración propia

Según la Figura 21 podemos evidenciar que para valores de queue mayores a 1.6 minutos la productividad de carguío de palas estuvo por encima de 3500 ton/h durante el periodo de enero a setiembre 2023, con la excepción de los meses de marzo a mayo en el frente de la Pala 01 afectado por la presencia de frente duro en su frente en fase 3. La pala 3 ubicada entre los meses de enero a abril en fase 2 presentó productividades menores a las 3000 t/h afectado por la subasignación de camiones con respecto a los requeridos para cumplir su ciclo, de la misma manera presenta valores de queue menores a 1.5 minutos, lo que evidencia que la asignación de sus camiones no ha sido óptima pues es un valor elevado para un escenario de déficit de camiones.

Figura 22

Hang vs Productividad de carguío de pala



Nota: Elaboración propia

Según la Figura 22 se muestra claramente la tendencia de a menores valores de hang, la productividad del equipo de carguío aumenta, afectado durante 3 meses por presencia de frente duro en la Pala 01 y el alto hang durante enero y abril en Pala 03 por subasignación de camiones.

3.5 Plan de mejora de la situación actual

Tomando como punto de partida los resultados de indicadores históricos durante los meses de enero a setiembre 2023 se identificó que hay oportunidades de mejora en la asignación de camiones a los equipos de carguío, específicamente se evidencia deficiencias para mantener los valores de los indicadores queue y hang dentro de los target, motivo por el cual, para proporcionar a los supervisores de despacho las herramientas para poder controlar de manera efectiva sus indicadores clave se decidió definir los rangos operativos óptimos para los indicadores queue y hang aplicando el criterio del Fleet Match.

Para el desarrollo del análisis, se construyó una base de datos a partir de los datos históricos registrados en el sistema de gestión de flota (FMS), correspondiente al período julio-setiembre de 2023 para considerar las condiciones operativas más recientes. Esta base de datos inicial contiene más de 70000 registros de ciclos de camiones en palas, la cual está segmentada por día, turno, hora de trabajo, equipo de carguío, acarreo, entre otros campos.

Dado el gran volumen de información, en los Anexos 01 y 02 se presenta una muestra representativa de dicha base. En el Anexo 01 representa una tabla que consolida los indicadores necesarios de los ciclos de camiones distribuidos por día, turno, y hora de trabajo. En el Anexo 02 se visualiza la continuación de la tabla del Anexo 01 pero que contiene solamente campos calculados necesarios para realizar el análisis del Fleet Match.

Los principales campos calculados fueron:

- Queue (min): Representa el tiempo de cola de camiones en minutos, el FMS proporciona el campo expresado en segundos, se obtiene de una conversión simple de segundos a minutos.
- Queue (%): Representa el porcentaje de tiempo que representa la actividad de cola de camiones con respecto al tiempo total del ciclo de acarreo.
- Hang (min): Representa el tiempo de inactividad de pala por la espera de camión, el FMS proporciona el campo expresado en segundos, se obtiene de una conversión simple de segundos a minutos.
- Hang (%): Representa el porcentaje de tiempo que representa la actividad de espera de pala por camión con respecto al tiempo total del ciclo de carguío.
- Eficiencia de carguío y acarreo: Son métricas derivadas del queue y hang. Permiten medir el grado de utilización efectiva de cada tipo de equipo.
- Match loader (%): Indica el valor del Fleet Match Overtruck.

$$Match\ loader = FM - over = \frac{Eficiencia\ de\ carguío}{Eficiencia\ de\ acarreo} \quad (20)$$

- Match acarreo (%): Indica el valor del Fleet Match Undertruck.

$$Match \text{ acarreo} = FM - \text{under} = \frac{\text{Eficiencia de acarreo}}{\text{Eficiencia de carguío}} \quad (21)$$

- Costo horario (\$/TM): Representa el costo total asociado al uso de equipo de carguío y acarreo para producir una tonelada de mineral durante la hora de trabajo analizada.

$$\text{Costo horario} \left(\frac{\$}{TM} \right) = \frac{\sum(\text{Tiempo operativo} * \text{Costo horario de equipo})}{\text{Toneladas producidas}} \quad (22)$$

Los costos operativos considerados para el cálculo del costo de horas máquina son los siguientes:

- Costo de Acarreo (\$/hr) = 200
- Costo de Carguío (\$/hr) = 142
- Toneladas (TM): Representa las toneladas producidas divididas expresadas en 100000 toneladas.
- TM/HR-carguío: Representa la productividad de carguío expresada en 10000 toneladas.
- TM/HR-acarreo: Representa la productividad de acarreo expresada en 1000 toneladas.

3.6 Cálculo de los rangos operativos de los indicadores Queue y Hang

El análisis de los indicadores queue y hang se realizó aplicando el Fleet Match, específicamente el criterio del Fleet Match, una herramienta analítica que permite evaluar el equilibrio entre la eficiencia de la flota de carguío y acarreo.

Para este análisis será necesario segmentar el análisis para dos escenarios antagónicos como son:

- Exceso de camiones (MF > 1)
- Déficit de camiones (MF < 1)

3.6.1 Caso Overtruck (Exceso de camiones)

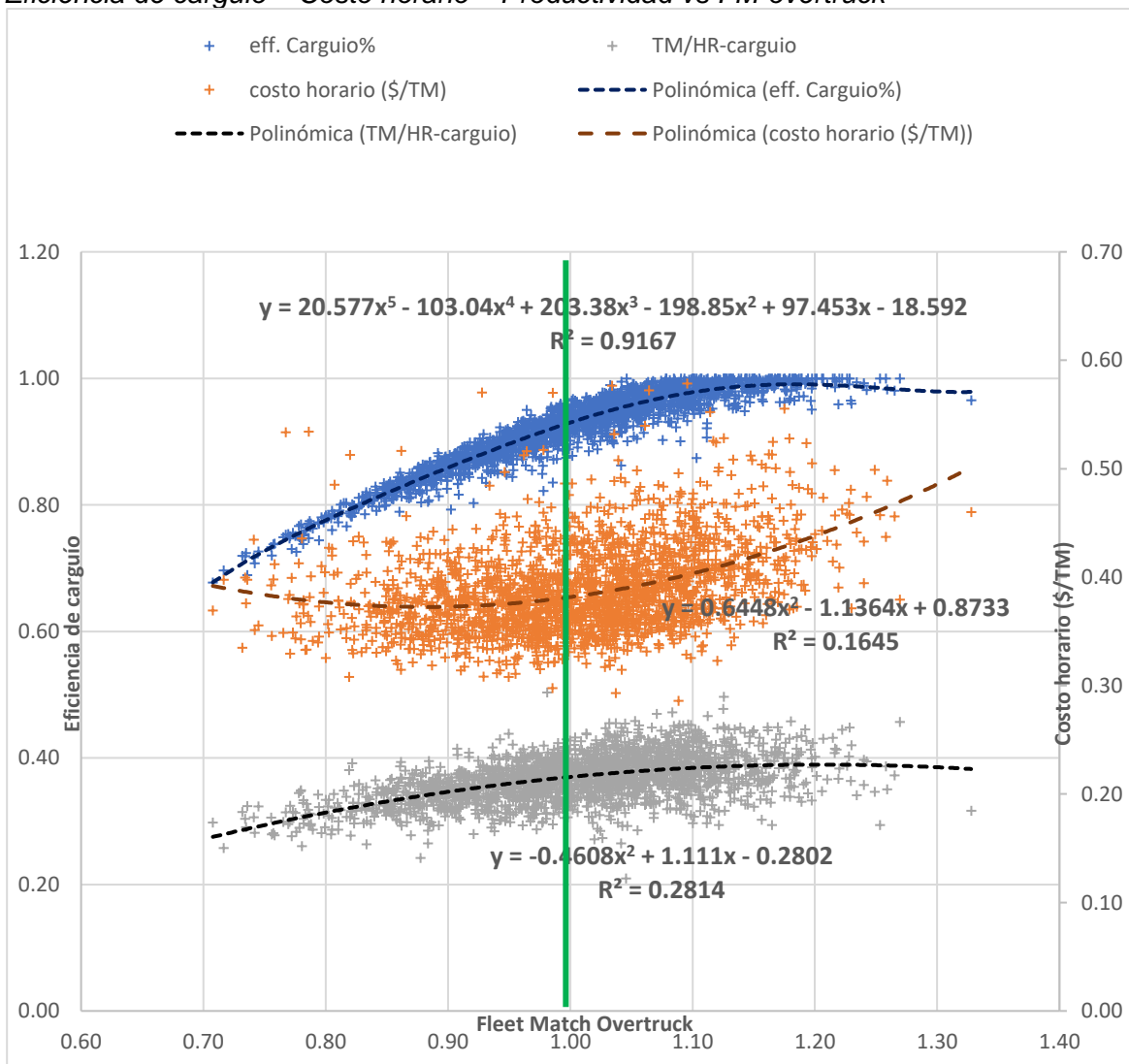
El escenario de exceso de camiones se caracteriza por una asignación de flota superior a la capacidad de carguío disponible, lo que genera acumulación de camiones en cola (queue), disminuyendo la eficiencia del sistema.

Para desarrollar este caso se utilizará la base de datos consolidada de los ciclos acarreo y procedemos a representar en un gráfico de dispersión las curvas:

- Eficiencia de carguío vs Match loader (FM-overtruck)
- Costo horario vs Match loader (FM-overtruck)
- Productividad de carguío Match loader (FM-overtruck)

Figura 23

Eficiencia de carguío – Costo horario – Productividad vs FM-overtruck



Nota: Elaboración propia

A partir de los gráficos de dispersión y haciendo uso de hojas de cálculo podemos buscar las funciones que más se ajustan a la distribución de los puntos.

Siendo las siguientes ecuaciones las que mejor describen los puntos analizados:

$$Eff. \text{carguío} = 20.577X^5 - 103.04X^4 + 203.38X^3 - 198.85X^2 + 97.453X - 18.592 \quad (23)$$

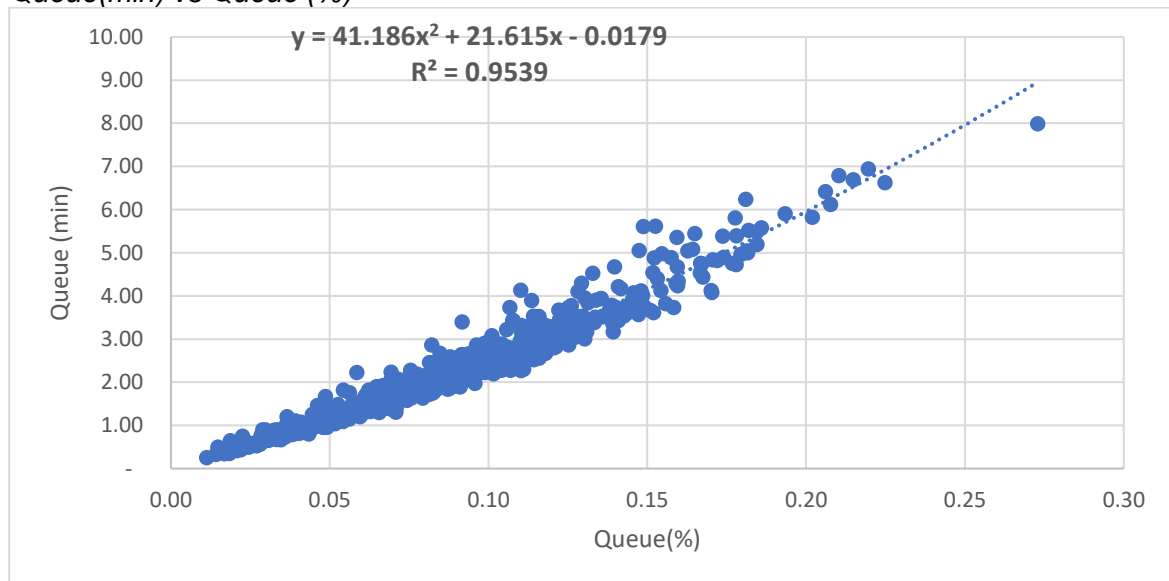
$$Costo\left(\frac{\$}{t}\right) = 0.6448X^2 - 1.1364X + 0.8733 \quad (24)$$

$$Productividad \text{ de carguío} = -0.4608X^2 + 1.111X - 0.2802 \quad (25)$$

Para las funciones costo y productividad los valores del coeficiente de correlación R^2 son bajos debido a la variabilidad de los datos, pero se considerarán para el análisis, la ecuación de la eficiencia de carguío tiene un mejor valor de coeficiente de correlación, también se considerará para el análisis.

Figura 24

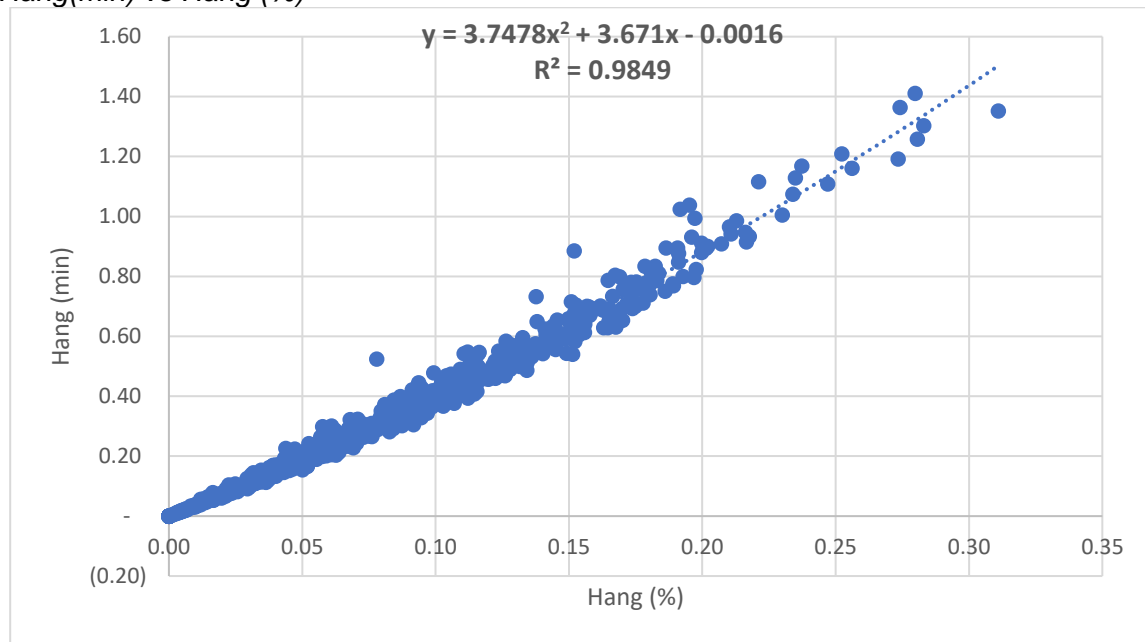
Queue(min) vs Queue (%)



Nota: Elaboración propia

Figura 25

Hang(min) vs Hang (%)



Nota: Elaboración propia

A partir de las Figuras 24 y 25 se tiene las ecuaciones que pueden calcular el valor del Queue(min) y Hang(min) a partir de sus valores de Queue(%) y Hang(%)

$$Queue(min) = 41.186X^2 + 21.615X - 0.0179 \quad (26)$$

$$Hang(min) = 3.7478X^2 + 3.671X - 0.0016 \quad (27)$$

Una vez obtenido las ecuaciones de las funciones, procedemos a aplicarlos criterios de evaluación para determinar los rangos operativos:

Criterio del costo mínimo. Según la figura 8, debemos hallar el valor del FM-over para el cual la función Costo sea mínima, este valor del FM-over nos proporcionará una eficiencia de carguío, productividad de carguío e indicadores queue y hang para producir toneladas al costo mínimo, todos los demás valores de FM-over nos proporcionará un costo por tonelada mayor.

Aplicaremos el criterio de la primera derivada de la función costo sea igual a cero para determinar el valor mínimo de la función.

$$\frac{d(Costo \frac{\$}{t})}{dx} = 2 * 0.6448X - 1.1364 = 0 \quad (28)$$

Resolviendo la ecuación 28, obtenemos que FM-over para que el costo sea mínimo debe ser de 88.12%

Reemplazamos el FM-over en las ecuaciones (23), (24) y (25) y obtenemos:

- Eficiencia de carguío = 84.3%
- Costo mínimo (\$/ton) = 0.3726
- Productividad de carguío (ton/hr) = 3347.9

Con los valores obtenidos aplicamos la ecuación (20) del FM-over para determinar la Eficiencia de acarreo. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de acarreo = 96.47%
- Queue (%) = 3.53%
- Hang (%) = 15.7%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio del costo mínimo aplicando las ecuaciones (26) y (27), obteniendo:

- Queue (min) = 0.80
- Hang (min) = 0.66

Criterio de la máxima productividad. Ante un escenario de exceso de camiones, la producción del sistema pala-camión dependerá de la productividad de la pala y cuantos camiones pueda cargar.

Para maximizar la productividad de la pala aplicaremos el criterio de la primera derivada para encontrar el valor del FM-over para el cual la productividad de carguío es máxima.

$$\frac{d(\text{Productividad carguío})}{dx} = 2 * -0.4608X^1 + 1.111 = 0 \quad (29)$$

Resolviendo la ecuación 29, obtenemos que el FM-over para el cual la productividad de carguío es máxima debe ser de 120.55%.

Reemplazamos el FM-over en las ecuaciones (23), y (25) y obtenemos:

- Eficiencia de carguío = 98.63%

- Productividad de carguío (ton/hr) = 3894.62

Con los valores obtenidos aplicamos la ecuación (20) del FM-over para determinar la Eficiencia de acarreo. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de acarreo = 82.82%
- Queue (%) = 18.18%
- Hang (%) = 1.37%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio de máxima productividad aplicando las ecuaciones (26) y (27), obteniendo:

- Queue (min) = 5.27
- Hang (min) = 0.05

Criterio del Sistema balanceado. En este criterio se buscará que las colas de camiones como el tiempo de espera de palas esté equilibrado, para tal motivo, se considerará el FM-over=1. Luego reemplazamos el FM-over en las ecuaciones (23), (24) y (25) y obtenemos:

- Eficiencia de carguío = 92.28%
- Productividad de carguío (ton/hr) = 3700

Dado que el FM-over=1 las eficiencias son iguales. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de acarreo = 92.28%
- Queue (%) = 7.72%
- Hang (%) = 7.72%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio de sistema balanceado aplicando las ecuaciones (8) y (9), obteniendo:

- Queue (min) = 1.9

- Hang (min) = 0.3

Por tanto, del análisis del caso Overtruck, los parámetros de los indicadores se encuentran en los siguientes rangos:

$0.05 \text{ minutos (máxima productividad)} < \text{Hang} < 0.66 \text{ minutos (mínimo costo)}$

$0.8 \text{ minutos (mínimo costo)} < \text{Queue} < 5.27 \text{ minutos (máxima productividad)}$

Para que haya un equilibrio entre la eficiencia de carguío y la de acarreo, considerando un FM-over = 1 los rangos serían los siguientes:

$0.3 \text{ minutos (sistema balanceado)} < \text{Hang} < 0.66 \text{ minutos (mínimo costo)}$

$0.8 \text{ minutos (mínimo costo)} < \text{Queue} < 1.9 \text{ minutos (sistema balanceado)}$

3.6.2 Caso Undertruck (déficit de camiones)

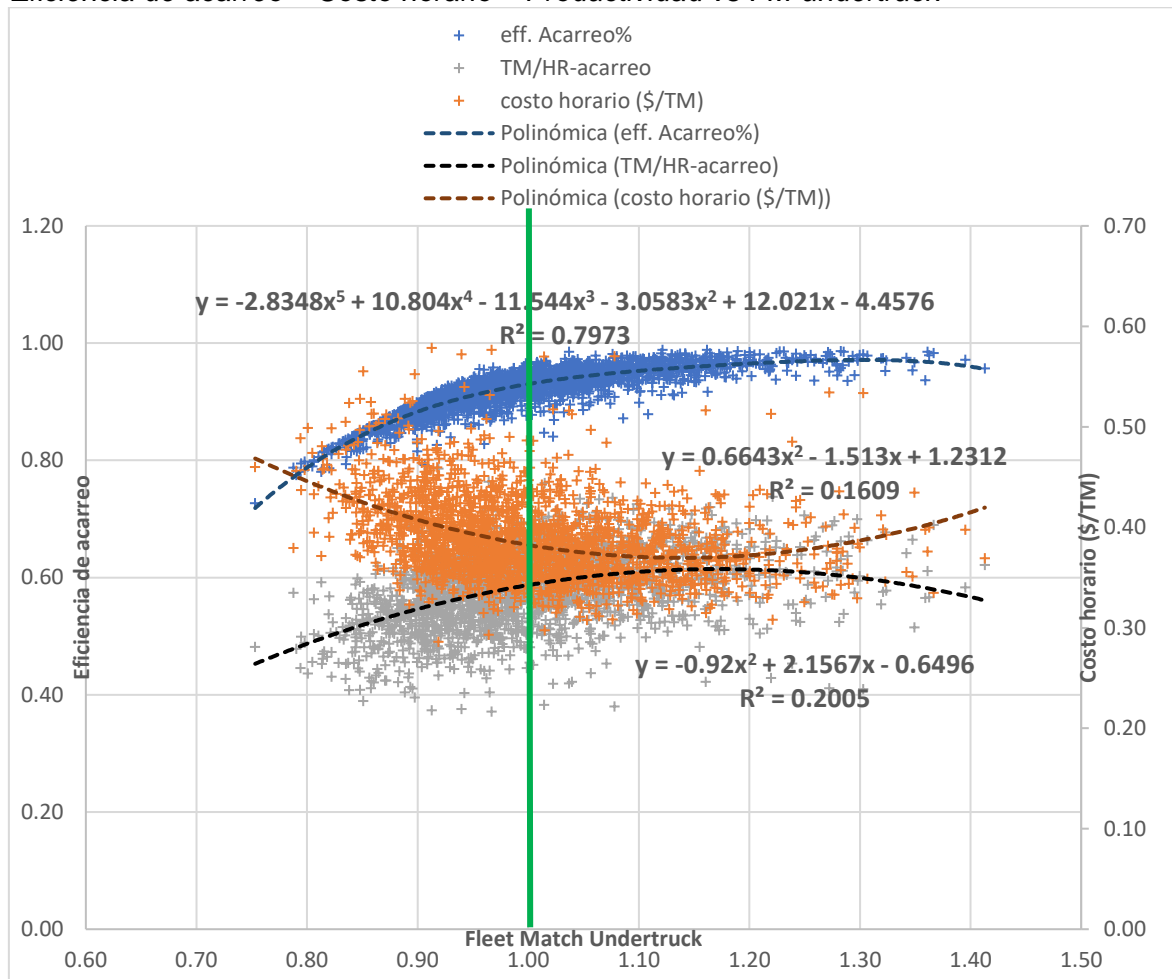
El escenario de déficit de camiones se caracteriza por una asignación de flota inferior a la capacidad de carguío disponible, lo que genera tiempos de espera de pala por camiones, disminuyendo la eficiencia del sistema.

Para desarrollar este caso se utilizará la base de datos consolidada de los ciclos acarreo y procedemos a representar en un gráfico de dispersión las curvas:

- Eficiencia de acarreo vs Match acarreo (FM-undertruck)
- Costo horario vs Match acarreo (FM-undertruck)
- Productividad de acarreo vs Match acarreo (FM-undertruck)

Figura 26

Eficiencia de acarreo – Costo horario – Productividad vs FM-undertruck



Nota: Elaboración propia

Las ecuaciones que más se ajustan a la distribución de los puntos son las siguientes:

$$Eff. \text{acarreo} = -2.8348X^5 + 10.804X^4 - 11.544X^3 - 3.0583X^2 + 12.021X - 4.4576 \quad (30)$$

$$Costo\left(\frac{\$}{t}\right) = 0.6443X^2 - 1.513X + 1.2312 \quad (31)$$

$$Productividad \text{ de acarreo} = -0.92X^2 + 2.1567X - 0.6496 \quad (32)$$

Una vez obtenido las ecuaciones de las funciones, procedemos a aplicarlos criterios de evaluación para determinar los rangos operativos:

Criterio del costo mínimo. Aplicaremos el criterio de la primera derivada de la función costo sea igual a cero para determinar el valor mínimo de la función.

$$\frac{d(\text{Costo } \frac{\$}{t})}{dx} = 2 * 0.6643X^1 - 1.513 = 0 \quad (33)$$

Resolviendo la ecuación 33, el FM-under para el que el costo es mínimo viene a ser 113.88%.

Reemplazamos el FM-under en las ecuaciones (10), (11) y (12) y obtenemos:

- Eficiencia de acarreo = 95.8%
- Costo mínimo (\$/ton) = 0.36
- Productividad de acarreo (ton/hr) = 613.33

Con los valores obtenidos aplicamos la ecuación (21) del FM-under para determinar la Eficiencia de carguío. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de carguío = 84.13%
- Queue (%) = 4.2%
- Hang (%) = 15.87%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio del costo mínimo aplicando las ecuaciones (26) y (27), obteniendo:

- Queue (min) = 0.96
- Hang (min) = 0.67

Criterio de la máxima productividad. Ante un escenario de déficit de camiones, se requiere optimizar el rendimiento de los camiones disponibles, disminuyendo al mínimo el tiempo de espera de los camiones para que sean cargados.

Para maximizar la productividad de los camiones aplicaremos el criterio de la primera derivada para encontrar el valor del FM-under para el cual la productividad de acarreo es máxima.

$$\frac{d(\text{Productividad acarreo})}{dx} = 2 * -0.92X^1 + 2.1567 = 0 \quad (34)$$

Resolviendo la ecuación 34, el FM-under para el cual la productividad de acarreo es máxima es de 117.21%

Reemplazamos el FM-under en las ecuaciones (30), y (32) y obtenemos:

- Eficiencia de acarreo = 98.2%
- Productividad de acarreo (ton/hr) = 614.35

Con los valores obtenidos aplicamos la ecuación (21) del FM-under para determinar la Eficiencia de carguío. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de carguío = 82.07%
- Queue (%) = 1.8%
- Hang (%) = 17.93%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio de máxima productividad aplicando las ecuaciones (26) y (27), obteniendo:

- Queue (min) = 0.86
- Hang (min) = 0.78

Criterio del Sistema balanceado. En este criterio se buscará que las colas de camiones como el tiempo de espera de palas esté equilibrado, para tal motivo, se considerará el FM-under=1.

Reemplazamos el FM-under en las ecuaciones (30), (31) y (32) y obtenemos:

- Eficiencia de acarreo = 93.03%
- Productividad de acarreo (ton/hr) = 587.1

Dado que el FM-under=1 las eficiencias son iguales. Luego aplicamos las ecuaciones (9) y (10) para determinar el Queue(%) y Hang(%) a partir de las eficiencias de carguío y acarreo.

- Eficiencia de carguío = 93.03%
- Queue (%) = 6.97%
- Hang (%) = 6.97%

A partir de los porcentajes de queue y hang se puede determinar los valores en minutos para el criterio de sistema balanceado aplicando las ecuaciones (26) y (27), obteniendo:

- Queue (min) = 1.69
- Hang (min) = 0.27

Por tanto, del análisis del caso Undertruck, los parámetros de los indicadores se encuentran en los siguientes rangos:

$$0.67 \text{ minutos (mínimo costo)} < \text{Hang} < 0.78 \text{ minutos (máxima productividad)}$$

$$0.86 \text{ minutos (máxima productividad)} < \text{Queue} < 0.96 \text{ minutos (mínimo costo)}$$

Para que haya un equilibrio entre la eficiencia de carguío y la de acarreo, considerando un FM-under = 1 los rangos serían los siguientes:

$$0.27 \text{ minutos (sistema balanceado)} < \text{Hang} < 0.78 \text{ minutos (máxima productividad)}$$

$$0.86 \text{ minutos (máxima productividad)} < \text{Queue} < 1.69 \text{ minutos (sistema balanceado)}$$

3.7 Rangos operativos de queue y hang seleccionados

Los rangos seleccionados para los escenarios de exceso de camiones y déficit son los siguientes:

Caso de exceso de camiones (Overtruck):

$$0.30 \text{ minutos} < \text{Hang} < 0.66 \text{ minutos}$$

$$0.80 \text{ minutos} < \text{Queue} < 1.90 \text{ minutos}$$

Caso de déficit de camiones (Undertruck):

$$0.27 \text{ minutos} < \text{Hang} < 0.78 \text{ minutos}$$

$$0.86 \text{ minutos} < \text{Queue} < 1.69 \text{ minutos}$$

A partir del análisis de los indicadores queue y hang a partir de la información histórica y la aplicación del criterio del Fleet Match se estableció como estándar los rangos

operativos seleccionados y se aplicaron los controles para evidenciar resultados en el último bimestre del año 2023.

3.8 Eficiencias de carguío y acarreo para los escenarios seleccionados

Para los rangos seleccionados de los indicadores queue y hang las eficiencias de carguío y acarreo según los escenarios operativos de exceso o déficit de camiones son los siguientes:

Caso de exceso de camiones (Overtruck):

$$88.12\% < \textit{Eficiencia de carguío} < 92.28\%$$

$$92.28\% < \textit{Eficiencia de acarreo} < 96.47\%$$

Caso de déficit de camiones (Undertruck):

$$82.07\% < \textit{Eficiencia de carguío} < 93.03\%$$

$$93.03\% < \textit{Eficiencia de acarreo} < 98.20\%$$

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Aplicación de los rangos operativos a la operación

Durante el último bimestre del año 2023 (noviembre-diciembre), se implementaron los rangos operativos óptimos de los indicadores queue y hang definidos en el Capítulo 3. Esta implementación se realizó mediante:

- **Concientización al equipo de despacho mina:** se reforzó la importancia de mantener los indicadores queue y hang dentro de los rangos operativos óptimos, con el fin de maximizar la eficiencia del sistema pala-camión. Esta orientación permitió una toma de decisiones alineada con los objetivos de productividad y balance de flota.
- **Sensibilización a la supervisión de campo:** se promovió una cultura operativa enfocada en reducción de tiempos improductivos, destacando el impacto directo del queue y hang sobre la eficiencia global en los procesos de carguío y acarreo de material.
- **Uso de herramientas de monitoreo en tiempo real:** se empleó las herramientas digitales del sistema de gestión de flota para el seguimiento continuo de los indicadores queue y hang por pala y turno de trabajo. Se acompañó con reportes digitales a la supervisión para la detección temprana de desviaciones y poder tomar las medidas correctivas oportunas.

4.2 Comparación de indicadores antes y después de la implementación

Tabla 5

Periodos de análisis para la comparación de resultados

Periodo	Condición	Observación
Julio-Setiembre 2023	Sin aplicación de rangos operativos	Línea base
Noviembre-diciembre 2023	Con aplicación de rangos	Validación

Nota: Elaboración propia

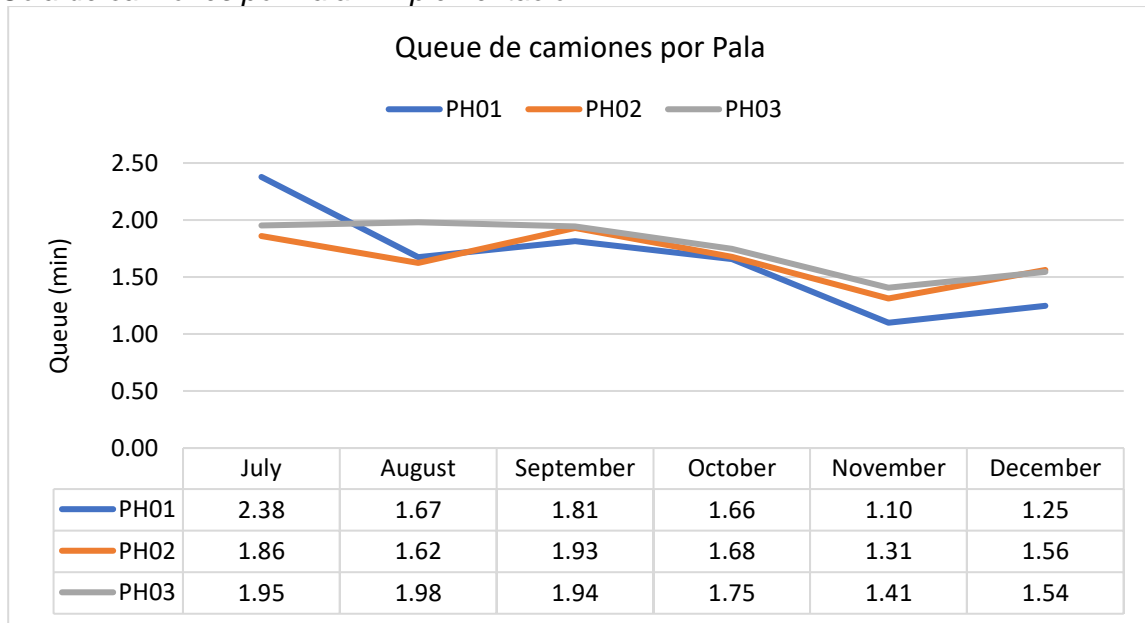
Al comparar los resultados de los periodos Julio-Octubre (línea base del análisis) con el periodo Noviembre-Diciembre (periodo de la implementación de la propuesta de mejora) los indicadores analizados fueron:

- Tiempo queue promedio (min)
- Tiempo hang promedio (min)
- Productividad de carguío (t/h)

Obteniéndose los siguientes resultados:

Figura 27

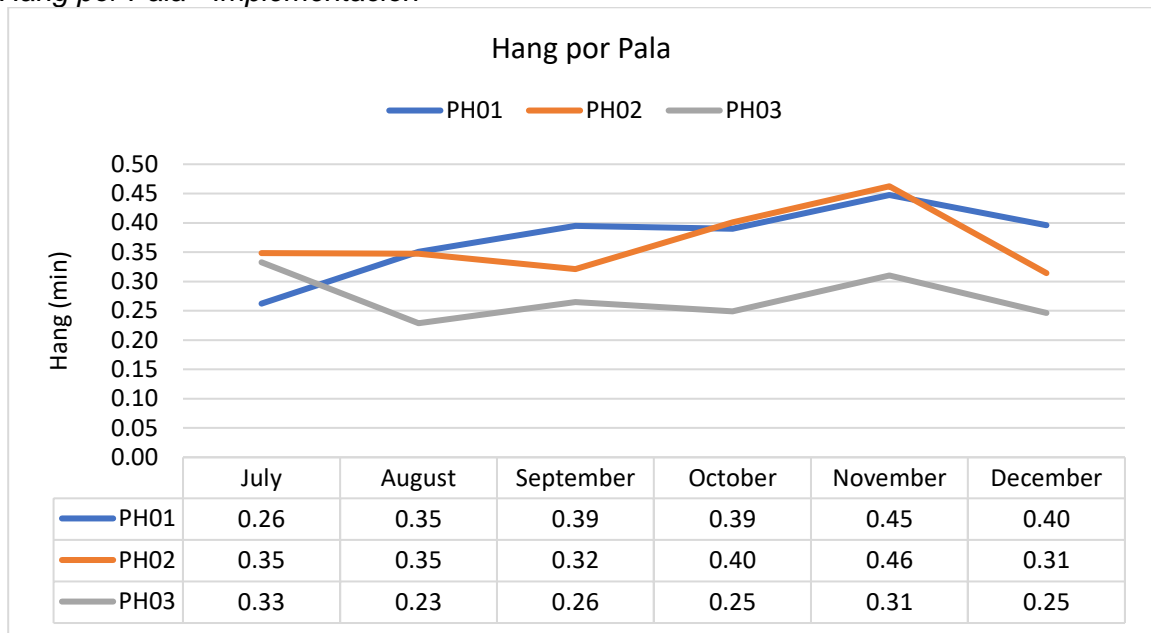
Cola de camiones por Pala - Implementación



Nota: Elaboración Propia

Figura 28

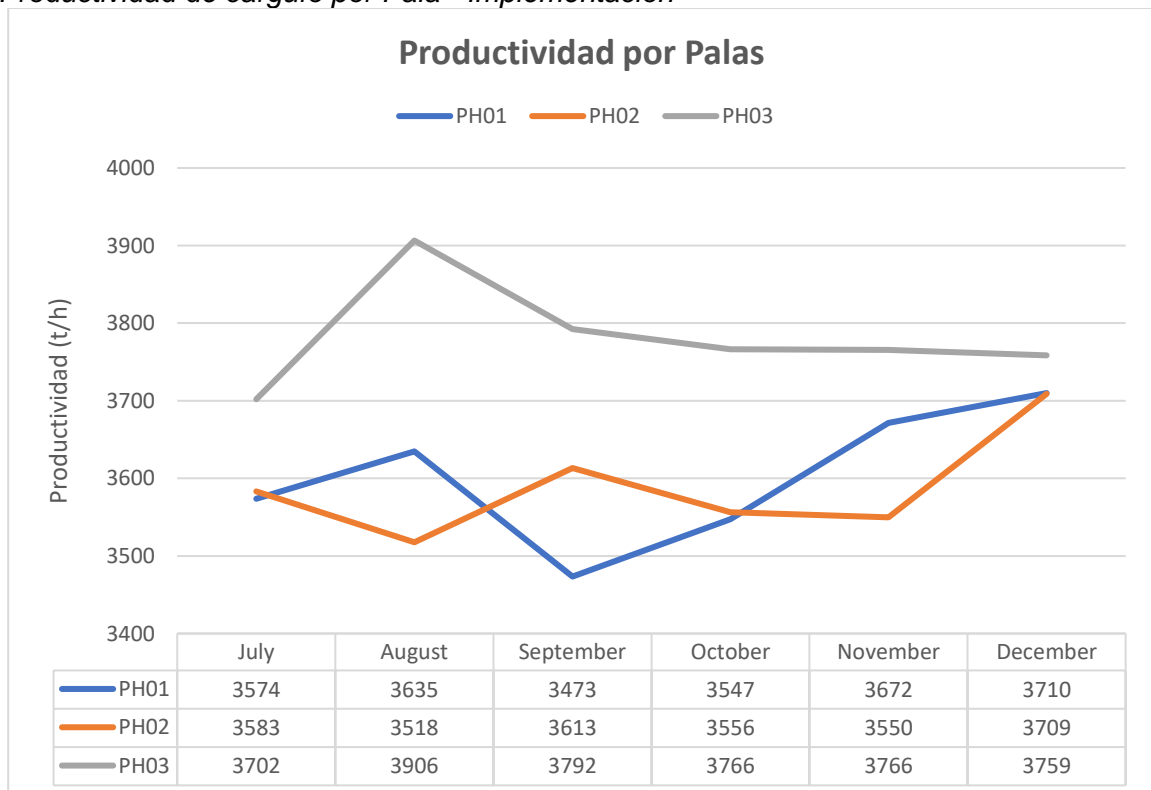
Hang por Pala - Implementación



Nota: Elaboración Propia

Figura 29

Productividad de carguío por Pala - Implementación



Nota: Elaboración Propia

Según la figura 27, los valores de cola de camiones tras la implementación de los rangos operativos son menores a los registrados durante el periodo de análisis de julio a

setiembre 2023. Asimismo, según la figura 28, los valores de hang en palas muestra un aumento durante el periodo de noviembre con respecto a los meses anterior y una disminución para el mes de diciembre, en contraste a estos datos y según la figura 29, la productividad de carguío aumentó en promedio con respecto al periodo de análisis de julio a setiembre, por lo que se evidencia una mejora en los tiempos de carguío y spot en palas.

En resumen, de la implementación se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6

Indicadores Queue, Hang, Productividad de carguío tras implementación

Indicador	Julio-Setiembre	Desviación Estándar	Noviembre – Diciembre	Desviación Estándar
Queue (min)	2.00	1.08	1.48	0.98
Hang (min)	0.31	0.26	0.33	0.28
Productividad de carguío (t/h)	3673.8	350	3737.8	329

Nota: Elaboración propia

4.3 Prueba de Hipótesis

Formulación de hipótesis nula

La hipótesis nula (H_0) es un concepto fundamental de la inferencia estadística. Se define como una proposición que establece que no hay un efecto significativo o diferencia entre grupos o condiciones, y que cualquier variación se debe al azar o fluctuaciones naturales del sistema. Se emplea esta hipótesis nula como una afirmación contraria a la hipótesis formulada, que se conocerá como la hipótesis alternativa (H_1). Primero se establece la hipótesis alternativa y para demostrar su validez se tendrá que evaluar su opuesto (hipótesis nula), si se logra demostrar que la hipótesis nula es incorrecta se demuestra la primera.

$$H_0 \rightarrow \mu \neq 1.53 \text{ min}$$

$$H_1 \rightarrow \mu = 1.53 \text{ min}$$

μ : Promedio de tiempo de cola de camiones

Analizando el tiempo de cola de camiones, determinamos la región de probabilidad normal (z): $P(z < 1.53 \text{ min})$.

Tabla 7*Estadísticas de cola de camiones antes y después de implementación*

Queue (min)	Julio-setiembre	Noviembre - diciembre
Media (μ_0)	2.00	1.48
Desviación estándar (σ)	1.08	0.98
Cuenta	2260	1378

Nota: Elaboración propia

Aplicando la fórmula para el valor de Z:

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma} \quad (35)$$

Usando la ecuación 35, determinamos que el valor de Z para los escenarios de Julio-setiembre y noviembre-diciembre. Una vez determinado los valores Z para los escenarios, procedemos a buscar el valor de la función de probabilidad en la tabla de distribución normal estándar que se encuentra en la figura 30.

Figura 30

Tabla de Distribución Normal Standard 1

z _i	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
-3,3	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
-3,2	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
-3,1	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
-3,0	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010	0,0010
-2,9	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013
-2,8	0,0025	0,0024	0,0024	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0019
-2,7	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0046	0,0045	0,0043	0,0042	0,0041	0,0040	0,0039	0,0037	0,0036	0,0035
-2,5	0,0062	0,0060	0,0058	0,0057	0,0055	0,0053	0,0052	0,0050	0,0049	0,0047
-2,4	0,0081	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0067	0,0065	0,0063
-2,3	0,0107	0,0104	0,0101	0,0099	0,0096	0,0093	0,0091	0,0088	0,0086	0,0084
-2,2	0,0139	0,0135	0,0132	0,0128	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
-2,1	0,0178	0,0174	0,0170	0,0165	0,0161	0,0157	0,0153	0,0150	0,0146	0,0142
-2,0	0,0227	0,0222	0,0216	0,0211	0,0206	0,0201	0,0196	0,0192	0,0187	0,0183
-1,9	0,0287	0,0280	0,0274	0,0268	0,0261	0,0255	0,0249	0,0244	0,0238	0,0232
-1,8	0,0359	0,0351	0,0343	0,0336	0,0328	0,0321	0,0314	0,0307	0,0300	0,0293
-1,7	0,0445	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0400	0,0392	0,0383	0,0375	0,0367
-1,6	0,0547	0,0536	0,0526	0,0515	0,0505	0,0494	0,0484	0,0474	0,0464	0,0455
-1,5	0,0668	0,0655	0,0642	0,0630	0,0617	0,0605	0,0593	0,0582	0,0570	0,0559
-1,4	0,0807	0,0792	0,0778	0,0763	0,0749	0,0735	0,0721	0,0707	0,0694	0,0681
-1,3	0,0968	0,0950	0,0934	0,0917	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0837	0,0822
-1,2	0,1150	0,1131	0,1112	0,1093	0,1074	0,1056	0,1038	0,1020	0,1002	0,0985
-1,1	0,1356	0,1334	0,1313	0,1292	0,1271	0,1250	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,0	0,1586	0,1562	0,1538	0,1515	0,1491	0,1468	0,1445	0,1423	0,1400	0,1378
-0,9	0,1840	0,1814	0,1787	0,1761	0,1736	0,1710	0,1685	0,1660	0,1635	0,1610
-0,8	0,2118	0,2089	0,2061	0,2032	0,2004	0,1976	0,1948	0,1921	0,1894	0,1867
-0,7	0,2419	0,2388	0,2357	0,2326	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2176	0,2147
-0,6	0,2742	0,2709	0,2676	0,2643	0,2610	0,2578	0,2546	0,2514	0,2482	0,2450
-0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2980	0,2945	0,2911	0,2877	0,2843	0,2809	0,2775
-0,4	0,3445	0,3409	0,3372	0,3335	0,3299	0,3263	0,3227	0,3191	0,3156	0,3120
-0,3	0,3820	0,3782	0,3744	0,3707	0,3669	0,3631	0,3594	0,3556	0,3519	0,3482
-0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4051	0,4012	0,3974	0,3935	0,3897	0,3859
-0,1	0,4601	0,4562	0,4522	0,4482	0,4443	0,4403	0,4364	0,4325	0,4285	0,4246
0,0	0,4999	0,5039	0,5079	0,5119	0,5159	0,5199	0,5239	0,5279	0,5318	0,5358
0,1	0,5398	0,5437	0,5477	0,5517	0,5556	0,5596	0,5635	0,5674	0,5714	0,5753
0,2	0,5792	0,5831	0,5870	0,5909	0,5948	0,5987	0,6025	0,6064	0,6102	0,6140
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6292	0,6330	0,6368	0,6405	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6590	0,6627	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6843	0,6879
0,5	0,6914	0,6949	0,6984	0,7019	0,7054	0,7088	0,7122	0,7156	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7290	0,7323	0,7356	0,7389	0,7421	0,7453	0,7485	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7703	0,7733	0,7763	0,7793	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7938	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8105	0,8132
0,9	0,8159	0,8185	0,8212	0,8238	0,8263	0,8289	0,8314	0,8339	0,8364	0,8389

Nota: Recuperado de (<https://www.medwave.cl/series/MBE04/5033.html>).

Para obtener el valor de la probabilidad del tiempo de cola de camiones se utiliza la Tabla de Distribución Normal Standard.

Tabla 8*Probabilidad de tiempo de cola de camiones menor a 1.53 minutos*

Queue (min)	Julio-Setiembre	Noviembre - Diciembre
Z	-0.44	0.05
Probabilidad	32.99%	51.99%

Nota: Elaboración propia

Según la distribución de probabilidad, se visualiza que la probabilidad de que la cola de camiones sea menor a 1.53 minutos (10% menor al target anterior de 1.7 minutos) es mucho mayor luego de aplicar los rangos operativos de queue y hang que sin aplicar la mejora, por lo que puede aceptarse la hipótesis alternativa en lugar de la hipótesis nula.

Se establece una nueva hipótesis nula e hipótesis alternativa a continuación:

$$H_0 \rightarrow \mu \neq 3550 \text{ t/h}$$

$$H_1 \rightarrow \mu = 3550 \text{ t/h}$$

μ : Promedio de productividad de carguío

Analizando la productividad de carguío de palas, determinamos la región de probabilidad normal (z): $P(z < 3550 \text{ t/h})$

Tabla 9*Productividad de carguío antes y después de implementación*

Productividad (t/h)	Julio-Setiembre	Noviembre - Diciembre
Media (μ_0)	3673.8	3737.8
Desviación estándar (σ)	350	329
Cuenta	2260	1378

Nota: Elaboración propia

Procedemos a aplicar la ecuación 35 para calcular el valor de Z. Una vez determinado los valores Z para los escenarios, procedemos a buscar el valor de la función de probabilidad en la tabla de distribución normal estándar que se encuentra en la figura 31.

Figura 31

Tabla de Distribución Normal Standard 2

z\	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
-3,3	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
-3,2	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
-3,1	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
-3,0	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010	0,0010
-2,9	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013
-2,8	0,0025	0,0024	0,0024	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0019
-2,7	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0046	0,0045	0,0043	0,0042	0,0041	0,0040	0,0039	0,0037	0,0036	0,0035
-2,5	0,0062	0,0060	0,0058	0,0057	0,0055	0,0053	0,0052	0,0050	0,0049	0,0047
-2,4	0,0081	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0067	0,0065	0,0063
-2,3	0,0107	0,0104	0,0101	0,0099	0,0096	0,0093	0,0091	0,0088	0,0086	0,0084
-2,2	0,0139	0,0135	0,0132	0,0128	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
-2,1	0,0178	0,0174	0,0170	0,0165	0,0161	0,0157	0,0153	0,0150	0,0146	0,0142
-2,0	0,0227	0,0222	0,0216	0,0211	0,0206	0,0201	0,0196	0,0192	0,0187	0,0183
-1,9	0,0287	0,0280	0,0274	0,0268	0,0261	0,0255	0,0249	0,0244	0,0238	0,0232
-1,8	0,0359	0,0351	0,0343	0,0336	0,0328	0,0321	0,0314	0,0307	0,0300	0,0293
-1,7	0,0445	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0400	0,0392	0,0383	0,0375	0,0367
-1,6	0,0547	0,0536	0,0526	0,0515	0,0505	0,0494	0,0484	0,0474	0,0464	0,0455
-1,5	0,0668	0,0655	0,0642	0,0630	0,0617	0,0605	0,0593	0,0582	0,0570	0,0559
-1,4	0,0807	0,0792	0,0778	0,0763	0,0749	0,0735	0,0721	0,0707	0,0694	0,0681
-1,3	0,0968	0,0950	0,0934	0,0917	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0837	0,0822
-1,2	0,1150	0,1131	0,1112	0,1093	0,1074	0,1056	0,1038	0,1020	0,1002	0,0985
-1,1	0,1356	0,1334	0,1313	0,1292	0,1271	0,1250	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,0	0,1586	0,1562	0,1538	0,1515	0,1491	0,1468	0,1445	0,1423	0,1400	0,1378
-0,9	0,1840	0,1814	0,1787	0,1761	0,1736	0,1710	0,1685	0,1660	0,1635	0,1610
-0,8	0,2118	0,2089	0,2061	0,2032	0,2004	0,1976	0,1948	0,1921	0,1894	0,1867
-0,7	0,2419	0,2388	0,2357	0,2326	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2176	0,2147
-0,6	0,2742	0,2709	0,2676	0,2643	0,2610	0,2578	0,2546	0,2514	0,2482	0,2450
-0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2980	0,2945	0,2911	0,2877	0,2843	0,2809	0,2775
-0,4	0,3445	0,3409	0,3372	0,3335	0,3299	0,3263	0,3227	0,3191	0,3156	0,3120
-0,3	0,3820	0,3782	0,3744	0,3707	0,3669	0,3631	0,3594	0,3556	0,3519	0,3482
-0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4051	0,4012	0,3974	0,3935	0,3897	0,3859
-0,1	0,4601	0,4562	0,4522	0,4482	0,4443	0,4403	0,4364	0,4325	0,4285	0,4246
0,0	0,4999	0,5039	0,5079	0,5119	0,5159	0,5199	0,5239	0,5279	0,5318	0,5358
0,1	0,5398	0,5437	0,5477	0,5517	0,5556	0,5596	0,5635	0,5674	0,5714	0,5753
0,2	0,5792	0,5831	0,5870	0,5909	0,5948	0,5987	0,6025	0,6064	0,6102	0,6140
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6292	0,6330	0,6368	0,6405	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6590	0,6627	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6843	0,6879
0,5	0,6914	0,6949	0,6984	0,7019	0,7054	0,7088	0,7122	0,7156	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7290	0,7323	0,7356	0,7389	0,7421	0,7453	0,7485	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7703	0,7733	0,7763	0,7793	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7938	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8105	0,8132
0,9	0,8159	0,8185	0,8212	0,8238	0,8263	0,8289	0,8314	0,8339	0,8364	0,8389

Nota: Recuperado de (<https://www.medwave.cl/series/MBE04/5033.html>).

Para obtener el valor de la probabilidad del tiempo de cola de camiones se utiliza la Tabla de Distribución Normal Standard.

Tabla 10*Probabilidad de productividad de carguío de palas menor a 3550 t/h*

Queue (min)	Julio-Setiembre	Noviembre - Diciembre
Z	-0.35	-0.57
Probabilidad	36.31%	28.43%

Nota: Elaboración propia

Según la distribución de probabilidad, se visualiza que la probabilidad de que la productividad de carguío de palas sea menor a 3550 t/h (sin comprometer el target de productividad de palas) es mucho menor luego de aplicar los rangos operativos de queue y hang que sin aplicar la mejora, por lo que puede aceptarse la hipótesis alternativa en lugar de la hipótesis nula.

4.4 Otros resultados operativos**Tabla 11***Indicadores del ciclo de carguío en Palas julio-diciembre 2023*

Equipo de carguío	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Pala 01						
Tiempo Spot (min)	0.98	0.98	0.97	1.08	0.92	0.92
Tiempo Hang (min)	0.26	0.35	0.39	0.39	0.45	0.40
Tiempo cargando (min)	2.70	2.56	2.70	2.51	2.47	2.48
Tiempo de ciclo carguío (min)	3.95	3.89	4.07	3.98	3.84	3.80
Productividad ciclo de carguío (t/h)	3574	3635	3473	3547	3672	3710
Pala 02						
Tiempo Spot (min)	1.00	1.01	0.96	0.98	0.96	0.92
Tiempo Hang (min)	0.35	0.35	0.32	0.40	0.46	0.31
Tiempo cargando (min)	2.59	2.66	2.63	2.59	2.55	2.56
Tiempo de ciclo carguío (min)	3.94	4.02	3.91	3.97	3.97	3.80
Productividad ciclo de carguío (t/h)	3583	3518	3613	3556	3550	3709
Pala 03						
Tiempo Spot (min)	1.03	0.95	0.92	0.92	0.96	0.92
Tiempo Hang (min)	0.33	0.23	0.26	0.25	0.31	0.25
Tiempo cargando (min)	2.45	2.44	2.54	2.57	2.48	2.59
Tiempo de ciclo carguío (min)	3.81	3.62	3.72	3.74	3.75	3.75
Productividad ciclo de carguío (t/h)	3702	3906	3792	3766	3766	3759

Nota: Elaboración propia

Tabla 12*Indicadores de acarreo por equipo de carguío julio-diciembre 2023*

Acarreo en mina	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Pala 01						
Tiempo ciclo acarreo (min)	26.6	26.2	27.1	27.2	26.6	27.4
Promedio de EFH Vacío (Km)	4.54	3.97	4.11	4.34	4.17	4.15
Promedio de EFH Cargado (Km)	5.24	5.55	5.66	5.74	5.93	6.23
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	530	538	521	519	531	515
Queue (min)	2.38	1.67	1.81	1.66	1.10	1.25
Tiempo Acarreando (min)	10.5	11.4	11.7	11.9	12.3	12.9
Pala 02						
Tiempo ciclo acarreo (min)	25.9	25.8	27.1	27.9	27.6	27.4
Promedio de EFH Vacío (Km)	4.41	3.90	4.08	4.39	4.27	4.15
Promedio de EFH Cargado (Km)	5.31	5.32	5.57	5.98	6.13	5.98
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	544	546	520	505	511	515
Queue (min)	1.86	1.62	1.93	1.68	1.31	1.56
Tiempo Acarreando (min)	10.6	10.9	11.5	12.4	12.7	12.4
Pala 03						
Tiempo ciclo acarreo (min)	21.1	20.4	20.2	20.3	19.3	20.8
Promedio de EFH Vacío (Km)	4.13	3.72	3.58	3.72	3.45	3.82
Promedio de EFH Cargado (Km)	3.25	2.88	2.79	2.87	2.86	3.08
Productividad ciclo acarreo (ton/h)	668	690	697	693	732	677
Queue (min)	1.95	1.98	1.94	1.75	1.41	1.54
Tiempo Acarreando (min)	6.5	6.0	5.8	5.9	5.9	6.4

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 11, se observa que durante el periodo de implementación de los rangos operativos para los indicadores de queue y hang, el tiempo total de carguío presentó una tendencia a la baja, logrando aumentar la productividad de carguío de palas, a pesar de que el tiempo hang en palas aumentó en algunas palas, el tiempo total de carguío se vio favorecido por la disminución en los tiempos de carguío y spot, logrando una mejor sinergia para no afectar los objetivos de productividad de carguío.

Asimismo, según la tabla 12, se evidencia una disminución significativa en el tiempo de cola de camiones durante el periodo de la implementación de los rangos operativos para los indicadores queue y hang, influyendo en un aumento de la productividad de

acarreo a pesar de presentar mayores distancias vacío y cargado según el EFH promedio, lo que evidencia que se mejoró la eficiencia de ciclo de acarreo.

4.5 Proyección de ahorro económico de la implementación

Durante el periodo de la implementación se registró un aumento de la productividad promedio de acarreo y una disminución del tiempo promedio de cola de camión en pala. Esta disminución del tiempo de cola de camión fue utilizada para realizar actividades operativas de acarreo de material del tajo, el cual será valorizado a continuación.

Tabla 13

Indicadores que mejoraron rendimiento con la implementación

Indicador	Periodo Base (julio-setiembre)	Periodo Implementación (noviembre- diciembre)	Variación
Queue	2.00 min	1.48 min	- 0.52 min/ciclo
Productividad de acarreo	515 t/h	543 t/h	+ 28 t/h

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 13, de los resultados de la implementación de los rangos operativos óptimos para los indicadores queue y hang se logró disminuir 0.52 minutos de tiempo de cola de camión por ciclo de camión, lo cual representó una disminución del 2.11% del tiempo del ciclo de acarreo asociado solamente a la actividad de tiempo de cola de camión en pala (queue), lo cual impactó en un aumento de la eficiencia de acarreo impactando en un aumento de la productividad de 28 toneladas por hora por camión, lo cual representa un aumento de 5.44% de la productividad de acarreo con respecto al caso base (julio-setiembre 2023).

Durante el periodo de la implementación de la propuesta de mejora (noviembre-diciembre) se registró un total de 31,736 horas operativas de camión. El costo histórico de la tonelada minada de material del tajo es de 1.1 dólares por tonelada según registros de costo de la unidad minera.

A partir de estos valores se puede determinar a cuánto asciende el ahorro económico de la implementación que se ve reflejado en un aumento de la productividad de acarreo a partir de la siguiente expresión matemática:

$$\text{Ahorro} = \text{Horas trabajadas (h)} * \text{Mejora de productividad} \left(\frac{t}{h}\right) * \text{Costo} \left(\frac{\$}{t}\right) \quad (36)$$

Aplicando la ecuación 36 para determinar el ahorro económico:

$$\text{Ahorro de la implementación} = 31,736 \text{ hr} * 28 \frac{t}{h} * 1.1 \frac{\$}{t} = 888,608 \text{ USD}$$

Conclusiones

La implementación de los rangos operativos óptimos para los indicadores queue y hang permitió cumplir los objetivos planteados como sustento del trabajo de tesis, logrando establecer un estándar para control de indicadores en busca de eficiencia del sistema pala-camión y optimización de los recursos operativos a partir del análisis de indicadores históricos de la operación actual.

Se logró reducir significativamente los tiempos improductivos asociados en el sistema pala-camión. La comparación de la situación actual del periodo julio-setiembre y el periodo de la implementación de noviembre-diciembre evidencia una mejora estadísticamente significativa en el tiempo queue, manteniendo los valores por debajo del 10% del target vigente (1.7 minutos).

La productividad de carguío de palas durante la implementación se mantuvo dentro del rango objetivo (mayor a 3550 t/h), confirmando que la aplicación de los rangos operativos de los indicadores queue y hang no comprometió el rendimiento de palas, evidenciando que podemos lograr un balance operativo sin sacrificar capacidad de producción.

La productividad de acarreo durante la implementación presentó un aumento significativo, lo que evidencia que la disminución de los tiempos improductivos asociados al ciclo de acarreo aumenta la eficiencia, permitiendo transportar más toneladas por hora utilizando los mismos recursos.

El aumento de la productividad de acarreo durante el periodo de la implementación significó un ahorro de 888,608 USD producto de un mayor movimiento de toneladas minadas con la misma cantidad de recursos con respecto al caso base del periodo julio-setiembre 2023.

Para el escenario de exceso de camiones los rangos operativos óptimos para los indicadores queue y hang fue de 0.80 a 1.90 minutos y de 0.30 a 0.66 minutos

respectivamente; y para el escenario de déficit de camiones fue 0.86 a 1.69 minutos para el indicador queue y de 0.27 a 0.78 minutos para el indicador hang.

Para el escenario de exceso de camiones los rangos operativos óptimos de las eficiencias de carguío y acarreo fue de 88.12% a 92.28% y de 92.28% a 96.47% respectivamente; y para el escenario de déficit de camiones fue 82.07 a 93.03% para la eficiencia de carguío y de 93.03% a 98.20% para la eficiencia de acarreo.

El uso del sistema de gestión de flota (FMS) fue importante para el seguimiento de indicadores claves y la toma de decisiones operativas basada en datos para aplicar correcciones inmediatas ante desviaciones, fortaleciendo el control de campo.

El alineamiento entre supervisor de despacho de flota y supervisores de campo permitió mantener los indicadores dentro de los rangos definidos, enfocándose en una cultura de eficiencia.

La aplicación del método del Fleet Match es aplicable a otras unidades mineras con sistema de monitoreo de indicadores en tiempo real, permitiendo mejorar la gestión de flota en minería a tajo abierto.

Recomendaciones

Estandarizar la aplicación de rangos operativos como herramienta de control continuo. Se recomienda formalizar a través de documentos normativos y no normativos la aplicación durante los turnos de trabajo y reforzar al personal de supervisión la importancia del enfoque en reducción de tiempos improductivos para optimizar los recursos de la operación.

Implementar alertas automatizadas en el sistema de gestión de flota para desvíos de queue y hang por encima de los rangos operativos para disminuir la supervisión manual de indicadores.

Realizar evaluaciones periódicas de la efectividad de los rangos operativos. Se sugiere revisar los rangos de manera trimestral dado los cambios en las condiciones operativas de la mina, distribución de flota o cambios en la estrategia de minado.

Implementar un modelo predictivo que tenga acceso a la información histórica de la operación y pueda realizar el cálculo de los rangos operativos de manera automática, alertando posibles cuellos de botella en la operación antes de que ocurran.

Planificar el diseño de nuevos destinos de botaderos de desmonte, mineral marginal y stocks de mineral a distancias menores de los actuales con el fin de disminuir las rutas de acarreo y aumentar la productividad de acarreo, lo cual permitirá aumentar la proyección de producción de mina ante el permanente aumento de las distancias de acarreo por la profundización de la mina.

Referencias bibliográficas

- Castillo, J. (2014). *“Factor equivalente entre la flota de carguío y acarreo y su aplicación en el área de Dispatch en Minera Yanacocha”* [Informe de suficiencia, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.
- Chavez, J. (2023) *“Estudio de las demoras operativas de la flota de acarreo en minas a tajo abierto para incrementar la productividad de la operación”* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.
- González, V. (2018). *“Modelo evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi”* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile.
- Hustrulid, W. et al. (2013). *“Open Pit Mine Planning and Design”*. CRC Press.
- Loza, J. (2022). *“Aplicación de Match Factor para la productividad del carguío y transporte en la Empresa Minera Shougang Hierro Perú S.A.A.”* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio Universidad Nacional San Luis Gonzaga.
- Marcobre. (2023). *“Memoria Anual 2023”*.
https://newmarcobrewebsite.blob.core.windows.net/assets/Marcobre_Memoria%20Anual%202023_.pdf
- Marcobre. (2024a). *“Hacia una minería sostenible y responsable”*.
<https://marcobre.com/quehacemos>
- Marcobre. (2024b). *“Reporte de sostenibilidad 2024”*.
<https://newmarcobrewebsite.blob.core.windows.net/assets/Reporte%20de%20sostenibilidad%202024.pdf>
- Mauricio, G. (2015). *“Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca”* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.

- Minesense for Miners MS4M (2018). “Manual de operación del sistema Control Sense”.
- Minesense for Miners MS4M (2022). “Manual de Usuario C4M”.
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). “Qué es la minería”.
<https://mapainversiones.minem.gob.pe/ComoFunciona/FAQ#>
- Morgan W. and Peterson L. (1968). “Determining Shovel-truck Productivity”. *Revista Mining Engineering*, December Pag.76-80.
<https://es.scribd.com/document/319097344/Determining-Shovel-Truck-Productivity?v=0.496>
- Muñoz, J. (2024). “Modelo de planificación a corto plazo para optimizar flota de carguío y transporte” [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile.
- Pando, W. (2003). “Fleet Match como herramienta de gestión”. Minera Yanacocha S.R.L.
Manuscrito inédito.
- Poblete, C. (2010) “Costo de oportunidad en la utilización de los sistemas de despacho en minería a Cielo abierto” [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile.
- Sepúlveda, J. (1995). “Optimización de la relación pala–camión en minería a cielo abierto”.
Revista Minera de Chile.

Anexos

Pág.

Anexo 1: Muestra de base de datos de ciclos de acarreo separado por indicadores.....	1
Anexo 2: Muestra de base de datos adaptado para cálculo del Fleet Match.....	2

Anexo 1: Muestra de base de datos de ciclos de acarreo separado por indicadores

mes	date	Shift	Hour	Promedio de queue	Promedio de t_hang_carguio	Promedio de tiempo_total_acarreo	Promedio de tiempo_total_carguio	Suma de toneladas_secas	Suma de tiempo_total_acarreo	Suma de tiempo_total_carguio	Cuenta de Id	Suma de costo total
Jul	1/07/2023	A	7	59.75	53.98	1253.46	267.22	9398.16	50138.23	10688.65	40.00	3207.06
Jul	1/07/2023	A	8	46.73	43.10	1294.10	247.95	9633.11	53058.18	10166.14	41.00	3348.67
Jul	1/07/2023	A	9	149.40	35.56	1480.53	238.94	9163.21	57740.76	9318.81	39.00	3575.40
Jul	1/07/2023	A	10	182.66	12.36	1435.34	232.64	10103.02	61719.54	10003.55	43.00	3823.45
Jul	1/07/2023	A	11	74.88	53.65	1278.31	266.37	9868.07	53689.17	11187.70	42.00	3424.02
Jul	1/07/2023	A	12	80.91	64.47	1297.71	275.60	8693.30	48015.28	10197.34	37.00	3069.74
Jul	1/07/2023	A	13	41.35	45.39	1235.83	255.92	9163.21	48197.52	9980.78	39.00	3071.33
Jul	1/07/2023	A	14	63.71	20.84	1360.61	250.92	9163.21	53063.69	9785.97	39.00	3333.99
Jul	1/07/2023	A	15	51.66	46.03	1410.94	255.84	7283.57	43739.21	7931.07	31.00	2742.79
Jul	1/07/2023	A	16	113.04	38.41	1416.57	246.42	7283.57	43913.65	7639.06	31.00	2740.97
Jul	1/07/2023	A	17	124.94	5.14	1384.26	235.71	10337.98	60907.22	10371.13	44.00	3792.82
Jul	1/07/2023	A	18	35.19	45.43	1456.96	266.75	7753.48	48079.84	8802.77	33.00	3018.32
Jul	1/07/2023	B	0	223.75	1.06	1413.16	221.92	7518.53	45221.27	7101.39	32.00	2792.40
Jul	1/07/2023	B	1	113.05	8.39	1378.57	239.26	6343.76	37221.49	6460.01	27.00	2322.67
Jul	1/07/2023	B	2	182.69	12.60	1480.39	240.90	6578.71	41450.91	6745.32	28.00	2568.89
Jul	1/07/2023	B	3	113.23	10.08	1534.78	257.80	7753.48	50647.61	8507.51	33.00	3149.33
Jul	1/07/2023	B	4	311.41	26.68	1687.81	285.03	7988.44	57385.59	9690.88	34.00	3570.34
Jul	1/07/2023	B	5	146.44	13.71	1466.28	239.80	10337.98	64516.32	10551.31	44.00	4000.43
Jul	1/07/2023	B	6	374.46	7.90	2069.00	230.13	8223.39	72415.13	8054.56	35.00	4340.77
Jul	1/07/2023	B	19	72.17	21.08	1212.02	246.42	10337.98	53328.76	10842.37	44.00	3390.38
Jul	1/07/2023	B	20	48.97	18.37	1222.53	227.72	10103.02	52568.58	9792.16	43.00	3306.72
Jul	1/07/2023	B	21	50.63	38.04	1226.44	264.09	9398.16	49057.50	10563.78	40.00	3142.10
Jul	1/07/2023	B	22	86.13	22.97	1341.87	258.47	9868.07	56358.34	10855.75	42.00	3559.22
Jul	1/07/2023	B	23	148.39	32.88	1426.64	262.46	7988.44	48505.81	8923.70	34.00	3046.76
Jul	2/07/2023	A	7	141.35	48.64	1391.51	264.91	8693.30	51486.01	9801.55	37.00	3246.95
Jul	2/07/2023	A	8	146.58	2.61	1319.06	216.67	9633.11	54081.41	8883.39	41.00	3354.92
Jul	2/07/2023	A	9	151.27	9.08	1323.50	222.24	10807.88	60881.02	10223.10	46.00	3785.52
Jul	2/07/2023	A	10	136.76	2.04	1279.57	207.02	11277.79	61419.50	9936.73	48.00	3804.14
Jul	2/07/2023	A	11	77.85	8.56	1186.70	217.76	10807.88	54588.29	10017.02	46.00	3427.80
Jul	2/07/2023	A	12	104.11	12.91	1270.78	225.01	10337.98	55914.49	9900.33	44.00	3496.87
Jul	2/07/2023	A	13	147.80	9.54	1387.08	222.73	10337.98	61031.53	9800.03	44.00	3777.20
Jul	2/07/2023	A	14	115.23	13.89	1275.64	236.75	10103.02	54852.65	10180.08	43.00	3448.92
Jul	2/07/2023	A	15	133.36	5.02	1348.17	237.23	9398.16	53926.77	9489.18	40.00	3370.23
Jul	2/07/2023	A	16	125.25	27.01	1321.13	255.63	9868.07	55487.61	10736.58	42.00	3506.14
Jul	2/07/2023	A	17	136.17	19.59	1235.45	224.44	10572.93	55595.37	10099.59	45.00	3487.00
Jul	2/07/2023	A	18	188.99	3.82	1656.30	222.29	7988.44	56314.13	7557.71	34.00	3426.67
Jul	2/07/2023	B	0	167.03	0.60	1449.56	230.06	10103.02	62330.88	9892.73	43.00	3853.04
Jul	2/07/2023	B	1	134.63	7.54	1476.86	244.25	9868.07	62027.91	10258.32	42.00	3850.63
Jul	2/07/2023	B	2	175.37	11.51	1419.17	257.33	7753.48	46832.47	8491.81	33.00	2936.76
Jul	2/07/2023	B	3	143.27	10.13	1460.34	234.27	10337.98	64254.75	10307.74	44.00	3976.29
Jul	2/07/2023	B	4	147.10	16.39	1457.21	270.29	8928.25	55373.87	10270.86	38.00	3481.45
Jul	2/07/2023	B	5	283.43	4.00	1592.88	254.30	9868.07	66901.14	10680.57	42.00	4138.02
Jul	2/07/2023	B	6	336.63	17.55	2262.49	260.59	6578.71	63349.72	7296.43	28.00	3807.23
Jul	2/07/2023	B	19	137.92	16.83	1242.13	233.17	11042.84	58380.18	10959.14	47.00	3675.62

Anexo 2: Muestra de base de datos adaptado para cálculo del Fleet Match

		queue alto hang bajo >1, T-efectivoC > T-efectivoA		queue bajo hang alto >1, effC < effA		Productividad					
		carguio		acarreo		solo hrs ready			carguio *10000	acarreo *1000	
queue m	queue	hang mi	hang	eff. Acarreo	eff. Carguio	match loader(%)	match acarreo	costo horario (\$/TM)	TM	M/HR-ca	TM/HR-acarreo
1.00	0.05	0.90	0.20	0.95	0.80	0.84	1.19	0.3412	0.0940	0.31654	0.675
0.78	0.04	0.72	0.17	0.96	0.83	0.86	1.17	0.3476	0.0963	0.34112	0.654
2.49	0.10	0.59	0.15	0.90	0.85	0.95	1.06	0.3902	0.0916	0.35399	0.571
3.04	0.13	0.21	0.05	0.87	0.95	1.08	0.92	0.3784	0.1010	0.36358	0.589
1.25	0.06	0.89	0.20	0.94	0.80	0.85	1.18	0.3470	0.0987	0.31754	0.662
1.35	0.06	1.07	0.23	0.94	0.77	0.82	1.22	0.3531	0.0869	0.30690	0.652
0.69	0.03	0.76	0.18	0.97	0.82	0.85	1.17	0.3352	0.0916	0.33051	0.684
1.06	0.05	0.35	0.08	0.95	0.92	0.96	1.04	0.3638	0.0916	0.33709	0.622
0.86	0.04	0.77	0.18	0.96	0.82	0.85	1.17	0.3766	0.0728	0.33061	0.599
1.88	0.08	0.64	0.16	0.92	0.84	0.92	1.09	0.3763	0.0728	0.34325	0.597
2.08	0.09	0.09	0.02	0.91	0.98	1.08	0.93	0.3669	0.1034	0.35885	0.611
0.59	0.02	0.76	0.17	0.98	0.83	0.85	1.18	0.3893	0.0775	0.31709	0.581
3.73	0.16	0.02	0.00	0.84	1.00	1.18	0.85	0.3714	0.0752	0.38115	0.599
1.88	0.08	0.14	0.04	0.92	0.96	1.05	0.95	0.3661	0.0634	0.35352	0.614
3.04	0.12	0.21	0.05	0.88	0.95	1.08	0.92	0.3905	0.0658	0.35111	0.571
1.89	0.07	0.17	0.04	0.93	0.96	1.04	0.96	0.4062	0.0775	0.32809	0.551
5.19	0.18	0.44	0.09	0.82	0.91	1.11	0.90	0.4469	0.0799	0.29676	0.501
2.44	0.10	0.23	0.06	0.90	0.94	1.05	0.95	0.3870	0.1034	0.35272	0.577
6.24	0.18	0.13	0.03	0.82	0.97	1.18	0.85	0.5279	0.0822	0.36755	0.409
1.20	0.06	0.35	0.09	0.94	0.91	0.97	1.03	0.3280	0.1034	0.34325	0.698
0.82	0.04	0.31	0.08	0.96	0.92	0.96	1.04	0.3273	0.1010	0.37143	0.692
0.84	0.04	0.63	0.14	0.96	0.86	0.89	1.12	0.3343	0.0940	0.32028	0.690
1.44	0.06	0.38	0.09	0.94	0.91	0.97	1.03	0.3607	0.0987	0.32725	0.630
2.47	0.10	0.55	0.13	0.90	0.87	0.98	1.02	0.3814	0.0799	0.32227	0.593
2.36	0.10	0.81	0.18	0.90	0.82	0.91	1.10	0.3735	0.0869	0.31930	0.608
2.44	0.11	0.04	0.01	0.89	0.99	1.11	0.90	0.3483	0.0963	0.39038	0.641
2.52	0.11	0.15	0.04	0.89	0.96	1.08	0.92	0.3503	0.1081	0.38059	0.639
2.28	0.11	0.03	0.01	0.89	0.99	1.11	0.90	0.3373	0.1128	0.40859	0.661
1.30	0.07	0.14	0.04	0.93	0.96	1.03	0.97	0.3172	0.1081	0.38842	0.713
1.74	0.08	0.22	0.06	0.92	0.94	1.03	0.97	0.3383	0.1034	0.37591	0.666
2.46	0.11	0.16	0.04	0.89	0.96	1.07	0.93	0.3654	0.1034	0.37976	0.610
1.92	0.09	0.23	0.06	0.91	0.94	1.03	0.97	0.3414	0.1010	0.35727	0.663
2.22	0.10	0.08	0.02	0.90	0.98	1.09	0.92	0.3586	0.0940	0.35655	0.627
2.09	0.09	0.45	0.11	0.91	0.89	0.99	1.01	0.3553	0.0987	0.33088	0.640
2.27	0.11	0.33	0.09	0.89	0.91	1.03	0.97	0.3298	0.1057	0.37687	0.685
3.15	0.11	0.06	0.02	0.89	0.98	1.11	0.90	0.4290	0.0799	0.38052	0.511
2.78	0.12	0.01	0.00	0.88	1.00	1.13	0.89	0.3814	0.1010	0.36765	0.584
2.24	0.09	0.13	0.03	0.91	0.97	1.07	0.94	0.3902	0.0987	0.34630	0.573
2.92	0.12	0.19	0.04	0.88	0.96	1.09	0.92	0.3788	0.0775	0.32870	0.596
2.39	0.10	0.17	0.04	0.90	0.96	1.06	0.94	0.3846	0.1034	0.36106	0.579