



Mathematical model for fleet sizing using the match factor in an open-pit mine.



Joaquin Moscoso-García¹ , Keny Polo-Arratea¹ , Humberto Pehovaz-Álvarez¹ and Luis Arauzo¹
¹Ingeniería de Gestión Minera. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Lima, Perú.
u201916421@upc.edu.pe, u201919656@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe and pccilara@upc.edu.pe

Abstract—The open-pit mining industry is vital to the global economy, facing challenges in operational efficiency and cost management. Fleet sizing is crucial for optimization, requiring innovative approaches. Discrete event simulation using Arena software addresses fleet sizing complexities in open-pit mines, aiding in understanding operational delays and high costs. This research aims to develop a framework integrating process modeling and simulation in Arena, enabling real-time fleet decisions. The study reviews mining process simulation literature, open-pit mine characteristics, and proposes detailed models for geology, topography, and mining operations. Critical variables like equipment performance, productivity, and truck hours will be evaluated. Results aim to provide mining companies a valuable decision-making tool for efficient resource management and cost reduction. The study also explores simulation-based decision-making implications for sustainability and environmental responsibility in mining. Overall, this research contributes to open-pit mining optimization, utilizing Arena software for innovative fleet sizing decisions.

Keywords— Match Factor, Fleet Sizing, Surface Mines, Mathematical Model.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Mathematical model for fleet sizing using the match factor in an open-pit mine.

Joaquin Moscoso-García¹ , Keny Polo-Arratea¹ , Humberto Pehovaz-Álvarez¹ and Luis Arauzo¹
¹Ingeniería de Gestión Minera. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Lima, Perú.
u201916421@upc.edu.pe, u201919656@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe and pccilara@upc.edu.pe

Abstract—The open-pit mining industry is vital to the global economy, facing challenges in operational efficiency and cost management. Fleet sizing is crucial for optimization, requiring innovative approaches. Discrete event simulation using Arena software addresses fleet sizing complexities in open-pit mines, aiding in understanding operational delays and high costs. This research aims to develop a framework integrating process modeling and simulation in Arena, enabling real-time fleet decisions. The study reviews mining process simulation literature, open-pit mine characteristics, and proposes detailed models for geology, topography, and mining operations. Critical variables like equipment performance, productivity, and truck hours will be evaluated. Results aim to provide mining companies a valuable decision-making tool for efficient resource management and cost reduction. The study also explores simulation-based decision-making implications for sustainability and environmental responsibility in mining. Overall, this research contributes to open-pit mining optimization, utilizing Arena software for innovative fleet sizing decisions.

Keywords— Match Factor, Fleet Sizing, Surface Mines, Mathematical Model.

I. INTRODUCCIÓN

La mina de estudio es una de las minas de cobre más grandes del mundo, ubicada en la cordillera de los Andes, en el Perú. La mina cuenta con una flota de camiones de transporte de mineral que es fundamental para su operación. El dimensionamiento adecuado de la flota es una tarea importante para garantizar que se cumpla el plan de producción anual de la mina. La metodología tradicional para el dimensionamiento de flotas es determinística, es decir, se basa en valores promedio de las variables que afectan al ciclo de transporte. Sin embargo, esta metodología puede no ser precisa en condiciones operativas reales, ya que las variables que afectan al ciclo de transporte pueden variar de forma aleatoria. La simulación de eventos discretos es una herramienta que permite modelar sistemas complejos con variables aleatorias. La simulación puede utilizarse para el dimensionamiento de flotas, ya que permite evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

El objetivo es proponer un modelo de simulación de eventos discretos para el dimensionamiento de flotas en la mina ubicada en el departamento de Ancash. El modelo se implementará en el software Arena. El resultado principal que se espera lograr es un modelo de simulación que sea preciso y

confiable para el dimensionamiento de flotas en la mina. El modelo permitirá a la mina tomar decisiones informadas sobre el tamaño de su flota, lo que redundará en una mejora de la eficiencia y la productividad.

II. ESTADO DEL ARTE

El dimensionamiento de flota en una mina a tajo abierto es un aspecto crítico de la planificación minera, ya que afecta directamente la eficiencia y la rentabilidad de la operación. La determinación del tamaño de la flota de carguío y acarreo es una tarea crítica en cualquier operación de minería a cielo abierto donde el material se maneja usando el sistema de camiones y palas. Aunque el problema de encontrar el tamaño óptimo de la flota de carguío y acarreo se ha estudiado a fondo, existen dos deficiencias importantes: ignorar los efectos de los procesos posteriores en la operación e ignorar los efectos del sistema de gestión de flotas [1]. Se debe tomar en cuenta que esta etapa en las minas de tajo abierto representa hasta un 60% de costos operativos, por lo que se desea optimizar las operaciones y la gestión de flotas [2].

Cabe resaltar que un proceso de optimización hace referencia a la maximización o minimización de una función objetivo estableciendo valores adecuados. Un ejemplo claro se demuestra cuando una persona quiere ir de un lugar a otro y tiene múltiples rutas, entonces se debe tomar una decisión sobre que ruta sería la mejor. Esa misma situación ocurre en la etapa de carguío y acarreo, la cual busca minimizar el tiempo de viaje, el consumo de combustible, entre otros [2].

En los últimos años, se ha observado un aumento en la aplicación de modelos de simulación basada en eventos discretos (SBED) para optimizar este proceso, utilizando herramientas como el software Arena. Investigaciones recientes han demostrado un creciente interés en la aplicación de modelos de simulación en la industria minera. Autores como Smith et al. (2019) han destacado la eficacia de los modelos SBED para representar de manera realista la dinámica de una mina a tajo abierto. Este enfoque permite evaluar diferentes estrategias de dimensionamiento de flota en un entorno virtual antes de su implementación. El software Arena ha ganado prominencia como una herramienta valiosa para la simulación de sistemas complejos, incluidas las operaciones mineras. Se ha explorado el uso específico de Arena en la simulación de flotas mineras, destacando su capacidad para modelar interacciones detalladas entre equipos y condiciones operativas variables [3]. En el contexto del dimensionamiento de flota, varios enfoques y metodologías han sido propuestos. Se ha presentado un método

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

basado en optimización heurística que utiliza datos históricos y parámetros específicos de la mina para determinar la configuración óptima de la flota [4]. Este enfoque se complementa con la simulación SBED para validar y refinar los resultados obtenidos. Aunque los modelos de simulación han demostrado ser herramientas poderosas, persisten desafíos en su implementación práctica. Asimismo, se ha señalado la importancia de la validación continua de los modelos SBED con datos operativos reales para garantizar su precisión y utilidad a lo largo del tiempo [5].

El avance tecnológico ha propiciado un mayor interés en la simulación de procesos mineros. Por otro lado, se ha explorado la implementación de técnicas de inteligencia artificial, específicamente aprendizaje profundo, para mejorar la precisión de los modelos de simulación en el dimensionamiento de flota [6]. La convergencia de la simulación y la optimización ha sido una tendencia notable en los estudios actuales. Por ello, se ha propuesto un enfoque integrado que combina modelos de simulación dinámica y técnicas de optimización matemática para abordar la complejidad inherente en el dimensionamiento de flota en minas a tajo abierto [7]. El impacto ambiental de las operaciones mineras ha llevado a investigaciones centradas en estrategias sostenibles. Un estudio demostró que se han incorporado consideraciones ambientales en modelos de simulación [8], evaluando no solo la eficiencia operativa sino también los efectos ambientales asociados al dimensionamiento de flota. Para validar la eficacia de los modelos propuestos, algunos investigadores han llevado a cabo estudios de caso en operaciones mineras reales. Se presentó un caso donde aplicaron un modelo de simulación para optimizar el dimensionamiento de flota en una mina a tajo abierto, destacando los beneficios obtenidos en términos de eficiencia y rentabilidad [9]. A pesar de los avances significativos, persisten desafíos y áreas de investigación clave, por ello, se han señalado la necesidad de explorar enfoques más avanzados de optimización y simulación para abordar la incertidumbre inherente a las operaciones mineras, así como la consideración de factores económicos y sociales en el dimensionamiento de flota [10]. El estado actual de la investigación en modelos de simulación basada en eventos discretos para el dimensionamiento de flota en minas a tajo abierto refleja un crecimiento significativo en la aplicación de enfoques avanzados. La combinación de técnicas de optimización y simulación ofrece un marco integral para abordar los desafíos complejos de la planificación minera, destacando el papel fundamental del software Arena en este contexto.

La programación matemática como métodos estocásticos no pueden capturar de forma integral todos los aspectos necesarios del sistema pala-camión, por ello asegura que la simulación es el único método fiable para evaluar múltiples posibles escenarios para sistemas complejos [11]. La simulación de eventos discretos (DES) proporciona un medio para pronosticar el rendimiento futuro a partir de datos históricos que permite la toma de decisiones proactivas en relación con un proyecto minero [12]; sin embargo, se requiere

un conocimiento especializado para crear modelos DES. Un estudio de Latinoamérica demostró que se aplican una metodología estocástica que involucra una simulación de eventos discretos para recrear y estimar el desempeño del sistema de carguío y acarreo [13]. Dicha simulación la compararon con un enfoque determinista para analizar los beneficios que proporcionan los eventos discretos. La metodología SED demostró el impacto que produce la variabilidad de los parámetros de la etapa de carguío y acarreo. Como resultado obtuvieron que los modelos estocásticos diferían de los enfoques deterministas en la cantidad de camiones requeridos cada mes, así como las horas trabajadas por camión, productividad y el tiempo total del ciclo.

Se desarrolló un modelo de simulación para la minería a tajo abierto donde utilizaron el lenguaje de programación FORTRAN para maximizar la productividad del sistema pala-camión [2] [14]. Además, se aplicaron por primera vez el software ARENA a la industria minera para la simulación de eventos discretos a minas a tajo abierto discontinuas [2].

Un software como Arena se emplea para modelar cualquier proceso mediante el desarrollo de una simulación de eventos discretos. Permite una identificación rápida de posibles errores durante la simulación de sistemas camión-pala. Se diseñó un modelo de calibración en la que configuraron los camiones como entidades y se asignaron en grupos a un equipo de carga fija [13]. Sin embargo, este modelo de calibración no considero paradas de camiones para mantenimiento correctivo o mantenimiento preventivo, por lo tanto, la flota de camiones siempre se mantuvo disponible. Para el tamaño óptimo de los camiones en el estado actual de las operaciones se resuelve en un modelo basado en simulación en el software de simulación OptQuest for Arena, el cual se basa en el factor de coincidencia [15] [16]. El algoritmo y modelo de referencia se integran en una simulación de DES que imita los procesos de manejo de materiales de una mina de cobre.

III. APORTE

La investigación propone un modelo de simulación basada en eventos discretos que revoluciona el proceso de dimensionamiento de flota en minas a cielo abierto. El enfoque en eventos discretos, respaldado por el software Arena, se presenta como una herramienta poderosa para realizar un análisis detallado y preciso en el ámbito minero, particularmente en la mina. Este modelo se convierte en un aliado estratégico para garantizar la eficiencia y productividad de la operación, elementos cruciales en un contexto minero altamente competitivo. Además, destaca la relevancia del proceso de recopilación de datos como base sólida para el diseño del modelo de simulación. Al considerar variables clave como tiempo de ciclo, eficiencia de carga y descarga, y distancias de desplazamiento, la tesis asegura la representación fiel de la complejidad de la operación minera. Además, la inclusión de datos provenientes de fuentes confiables y la validación del modelo garantizan su precisión y confiabilidad.

El empleo del software Arena para el diseño del modelo resalta su aplicación práctica en la representación de la operación minera a cielo abierto. La consideración de variables como tonelajes cargados por equipos, tiempos fijos de ciclo, topografías, cantidad de camiones y retrasos operativos establece un modelo robusto que captura la realidad operativa de la mina. El análisis de los resultados de la simulación no solo proporciona información detallada sobre el desempeño de la flota, sino que también permite identificar cuellos de botella y áreas de mejora en la operación. La capacidad de evaluar el impacto de cambios en parámetros específicos facilita la toma de decisiones informada para optimizar el dimensionamiento de la flota, contribuyendo así a una operación minera más eficiente y rentable. Asimismo, subraya la relevancia de la simulación de eventos discretos con el software Arena al destacar beneficios significativos. La posibilidad de analizar diferentes configuraciones de la flota en un entorno virtual evita costosos experimentos y disminuye las interrupciones en la operación real. Este enfoque innovador ofrece una visión detallada de la interacción de los equipos de flota y su impacto en la productividad global de la mina, brindando la oportunidad de tomar decisiones fundamentadas para mejorar la operación minera.

El procedimiento para dimensionar la flota minera con respecto a la ya existente y presentar una simulación con un escenario que optimice la operación, así como los beneficios de realizar esta simulación [17]. El procedimiento comienza con la recopilación de datos relevantes, como tiempo de ciclo promedio, tiempo de espera promedio, utilización de equipos, eficiencia de carga y descarga, velocidades de los equipos, distancias de desplazamiento y registros de producción. Esta información servirá como base sólida para el diseño del modelo de simulación y poder determinar escenarios que optimicen la etapa de carguío y acarreo. El software Arena, se emplea en el diseño del modelo de simulación, que representa la operación de la mina a cielo abierto. Se consideran en el presente trabajo las variables como los tonelajes cargados por los equipos existentes, tiempos fijos de ciclo, topografías, cantidad de camiones y palas y los retrasos operativos [13]. Se establecen las relaciones lógicas y temporales entre las diferentes actividades y se definen las reglas de comportamiento. Luego, se realiza la validación del modelo de simulación, utilizando datos reales o resultados obtenidos de fuentes confiables. Esta etapa garantiza que el modelo sea una representación precisa y confiable de la operación minera, lo que brinda mayor confianza en los resultados obtenidos. A continuación, se ejecutan varios escenarios de simulación, donde se modifican los parámetros establecidos previamente. Se evalúan las diferentes configuraciones de la flota mediante 4 indicadores para explicar el comportamiento, entre ellos encontramos: Productividad (t/h), horas trabajadas, tiempo total del ciclo y camiones requeridos.

La investigación se posiciona como un recurso invaluable para la toma de decisiones en la operación minera. Los resultados esperados, incluyendo la determinación del número

óptimo de camiones requeridos y el análisis del impacto de cambios en la configuración de la flota, ofrecen una serie de herramientas cuantitativas para evaluar diferentes escenarios y configuraciones. Estos datos permiten identificar estrategias que maximizan la producción y eficiencia, apoyando así la optimización del uso de los recursos disponibles. Los métodos propuestos para adquirir información sobre los camiones mediante muestreo aleatorio simple y la simulación en base a seis semanas del nivel 3640 demuestran un enfoque metódico y preciso. Además, el uso de técnicas estadísticas como la Simulación de Eventos Discretos y el Análisis de Varianza (ANOVA) añade un rigor científico que eleva la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. En resumen, esta investigación no solo introduce un modelo innovador para el dimensionamiento de flota en la mina, sino que también establece un estándar para la aplicación práctica de la simulación de eventos discretos en la mejora continua de operaciones mineras a cielo abierto. Además, permite identificar cuellos de botella, ineficiencias y áreas de mejora en la operación. Además, la simulación permite evaluar el impacto de cambios en los parámetros y tomar decisiones informadas para optimizar el dimensionamiento de la flota, contribuyendo así a una operación minera más eficiente y rentable. Finalmente, resaltar que la simulación de eventos discretos con el software Arena para dimensionar la flota minera ofrece beneficios significativos, como la posibilidad de analizar diferentes configuraciones de la flota en un entorno virtual, evitando costosos experimentos o interrupciones en la operación real. La simulación proporciona una visión detallada de la interacción de los equipos de flota y su impacto en la productividad global de la mina, lo que ayuda a optimizar el dimensionamiento de la flota y a tomar decisiones fundamentadas para mejorar la operación minera.

IV. VALIDACIÓN

Se realizará la validación a partir de los datos obtenidos de una empresa minera grande en la región de Anchash. Como punto de destino inicial (origen) se tomará el nivel 3640 de la fase 6 de minado hacia la chancadora primaria. Para ello, la mina cuenta con un cierto número de equipos tanto palas como camiones a su disposición para realizar la configuración correspondiente. Asimismo, se toma en cuenta la disponibilidad y utilización de estos equipos para medir la productividad de cada uno. Además, se presentan los parámetros del tajo a tomar en consideración para la simulación en Arena.

Tabla 1: Parámetros del tajo

Parámetros	Unidad	Valor
Altura banco	m	15 simples, 30 dobles
Ancho banco	m	8 a 15

Talud de banco	Grados	65 a 72
Angulo interrampa	Grados	45 a 53
Ancho rampa	m	40
Pendiente de rampa	%	10
Altura de muro	m	2.8

En la etapa de carguío, la mina dispone de 7 palas eléctricas modelo 4100XPC de la marca P&H con una capacidad de 108 TM lo que nos da un total aproximado de 1260 TM de capacidad total de carga con estas palas con una disponibilidad del 86.8% y una utilización de 84%. Además, dispone de 4 palas hidráulicas modelo EX560 de la marca Hitachi con una capacidad de 60 TM lo que nos da un aproximado de 240 TM de capacidad total de carga con estas palas con una disponibilidad de 88% y una utilización de 80%. En la etapa de transporte, la mina dispone de 92 camiones KOMATSU 930 E/SE los cuales tienen una capacidad de 300 TM lo que nos da un aproximado de 27600 TM de capacidad total con una disponibilidad de 87% y una utilización de 78.13%. Adicionalmente, dispone de 25 camiones CATERPILLAR 793 D/F con una capacidad de 240 TM lo que nos da un aproximado de 6000 TM en total que cuentan con una disponibilidad de 85% y una utilización de 84.2%.

Otros datos que se tomarán al momento de realizar la simulación son los tiempos de transporte de las 6 semanas de explotación del nivel 3640 de la fase 6 de minado las cuales fueron un promedio para cada una de las semanas.

Tabla 2: Tiempos promedio tramo nivel 3640 - chancadora

Semana	1	2	3	4	5	6
Tiempo ida	10.15'	11.1'	12'	12.5'	13.2'	14.5'
Tiempo vuelta	2.38	2.71'	3.31'	3.64'	4.2'	4.81'

Para esta ruta se designó 2 pala que es la P&H y los camiones 8 CATERPILLAR 793 D/F y 40 KOMATSU 930 E/SE para extraer material del nivel 3640. Se analizará una comparativa entre el escenario real de mina durante 6 semanas que duro explotar dicho nivel y la simulación con 5 configuraciones para mejorar el proceso de carguío y acarreo. A partir de ello se realizará 100 corridas en el software Arena. Finalmente, representaremos los resultados mediante 4 métricas que son: Productividad (t/h), horas trabajadas, tiempo total del ciclo y camiones requeridos.

En dicho nivel se extrae un aproximado de 150,000 TM por día lo da un total para las 6 semanas de extracción un aproximado de 6,300,000 TM. Asimismo, la chancadora tiene una capacidad de 150,000 tpd y se utilizan 20 horas operativas por día. Las distancias por semana se presentan en la siguiente

tabla lo que corresponde a cómo va avanzando la explotación del nivel 3640 y como aumenta la distancia del frente a la chancadora.

Tabla 3: Distancias de frente a chancadora

Semana	1	2	3	4	5	6
Distancia (m)	1646	1742	1838	1934	2030	2126

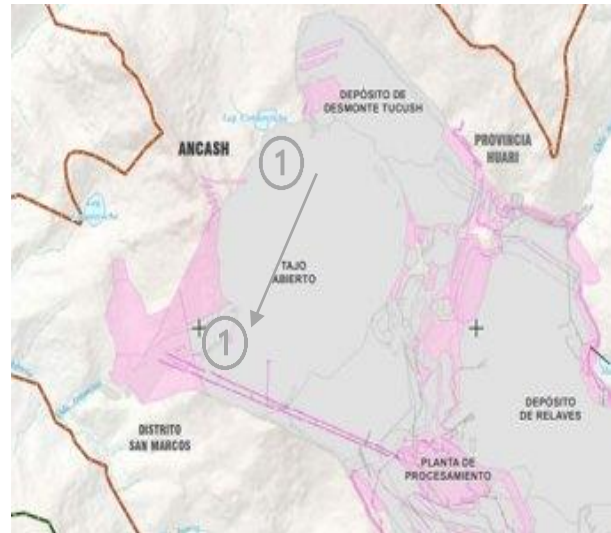


Figura 1: Mapa representativo de la zona a explotar

Una vez obtenido todos los datos se procede a realizar la simulación en el software Arena poniendo cada parámetro que se este pide. Al realizar el modelado de la ruta 1 en el software Arena empleamos ciertos módulos del Project bar Discrete processing, grouping y decisions, los cuales son los siguientes: Create, assign, hold, process y dispose. Primero debemos tener en claro que cada módulo cumple una función diferente. El módulo CREATE en Arena es una herramienta que te permite construir visualmente modelos de simulación de sistemas y procesos. El módulo ASSIGN en Arena es una herramienta que te permite asignar (como su propio nombre lo dice) valores a los atributos, variables, etc. En el módulo HOLD en Arena es una herramienta que te permite retener una entidad en una cola para esperar a una señal o a que una señal llegue a ser verdadera o detenida infinitamente. Por último, En el módulo PROCESS en Arena es una herramienta que te permite ocupar y liberar un recurso. Asimismo, la opción de especificar un "submodelo" y especificar jerárquicamente la lógica definida por el usuario.

Después de completar la edificación del modelo y módulos de simulación mediante el empleo del software Arena, se procede a efectuar las primeras iteraciones para diversas simulaciones con el propósito de determinar la configuración óptima. Se establecen los parámetros seleccionados, tales como los tiempos de ciclo, las distancias y la capacidad de los camiones, entre otros factores que inciden en la simulación, con

el objetivo de que esta se asemeje lo más posible al sistema real. Se tienen en cuenta los eventos que pueden ocurrir durante las fases de carga y transporte, sin descuidar la reproducción fidedigna de tales eventualidades.

El ciclo está programado dentro del software y abarca los siguientes pasos: la llegada a la zona de carga, el tiempo de maniobra para la carga, la carga de mineral, el transporte del camión cargado hacia la chancadora, el tiempo de maniobra para la descarga, la descarga de mineral, y el transporte del camión vacío de vuelta al frente. Esta secuencia es expuesta de manera lógica en el software para la creación del modelo y la ejecución de la simulación.

Después de llevar a cabo la simulación en este software, el resultado obtenido es la generación de datos y métricas que proporcionan una visión detallada del desempeño del sistema modelado. Estos resultados pueden incluir información sobre el tiempo de ciclo, la eficiencia operativa, la utilización de recursos, y otros indicadores relevantes según la naturaleza de la simulación.

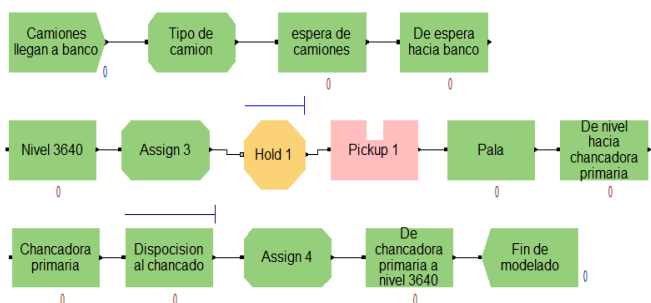


Figura 2: Modelo de simulación

Tras realizar exhaustivas simulaciones utilizando el software correspondiente, se han obtenido resultados significativos que arrojan luz sobre el rendimiento del sistema modelado. Los datos recopilados proporcionan una visión detallada de aspectos clave, como los tiempos de ciclo, la eficiencia operativa y la utilización de recursos.

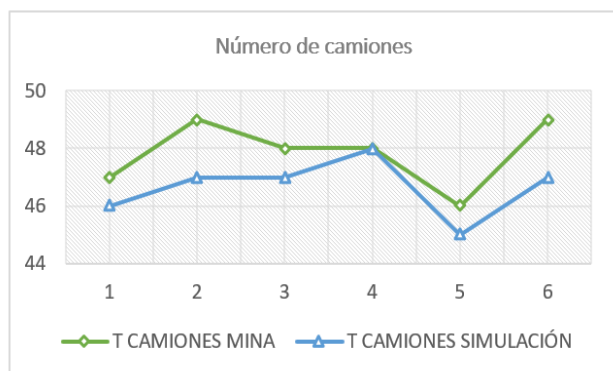


Figura 3: Número de camiones simulación vs mina

A lo largo de un periodo de seis semanas, se registra exhaustivamente el recuento total de vehículos de carga necesarios para la extracción de mineral desde el nivel 3940, tanto en la operación minera efectiva como en la simulación correspondiente. En el contexto de la operación minera, se evidencia una variabilidad en el número total de vehículos requeridos, oscilando entre 46 y 49. La semana con la menor necesidad de vehículos es la quinta, registrando un total de 46 unidades, mientras que la semana con la demanda más alta es la segunda, con un total de 49 vehículos. El promedio general de vehículos necesarios en la mina durante este periodo es de aproximadamente 47.83, denotando una cierta variabilidad semanal en la demanda vehicular.

Contrastando con la operación minera real, en el escenario de simulación, el recuento total de vehículos necesarios varía entre 45 y 48. La semana con la menor necesidad de vehículos es la quinta, con un total de 45 unidades, mientras que la semana con la demanda más alta es la cuarta, con 48 vehículos en total. El promedio general de vehículos necesarios en la simulación durante estas seis semanas es de aproximadamente 46.83, también reflejando cierta variabilidad semanal en la demanda. Aunque los patrones de fluctuación en los requerimientos vehiculares tanto en la operación minera real como en la simulación son similares a lo largo del periodo analizado, se destaca que, en promedio, la operación minera real exhibe una ligera predisposición a requerir más vehículos en comparación con la simulación.

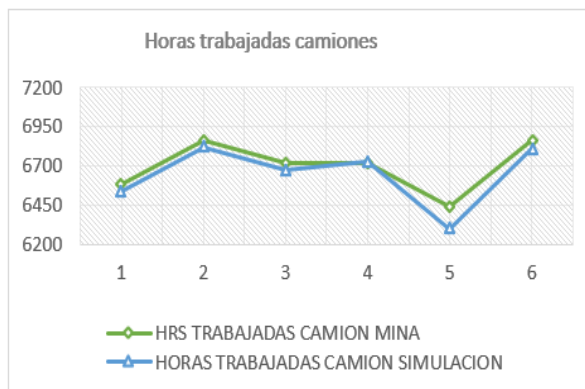


Figura 4: Horas trabajadas camión simulación vs mina

Se requiere una equivalencia en horas de trabajo entre la operación minera y la simulación. Al contrastar estas métricas, se observa que tanto el promedio como la mediana de las horas trabajadas son ligeramente superiores para el camión de mina en comparación con el camión de simulación. Además, el rango y la desviación estándar del camión de simulación exhiben valores más altos, indicando una mayor variabilidad en los tiempos de trabajo en comparación con el camión de mina. Este análisis proporciona una perspectiva integral sobre las disparidades en términos de tiempo de trabajo entre estos dos conjuntos de datos.

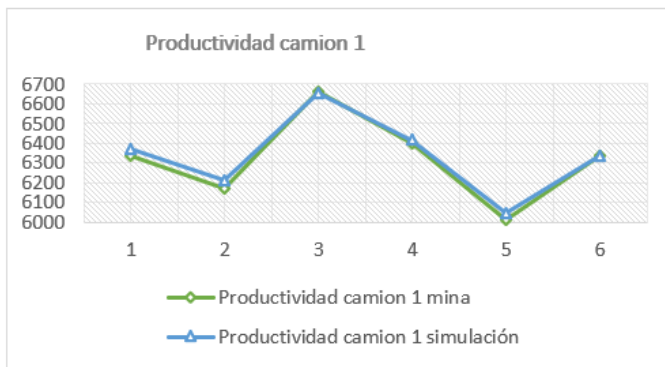


Figura 5: Productividad camión 1 simulación vs mina

En el análisis de la productividad de los camiones mineros, medida en toneladas por hora, se observa un patrón general de rendimiento a lo largo de las semanas. Para el camión 1 en la mina, la productividad oscila entre 6012.5 y 6663 toneladas por hora. El promedio semanal de la productividad para este camión en la mina es aproximadamente 6317 toneladas por hora, con variabilidad entre semanas. En el escenario de simulación, el camión 1 muestra una productividad que varía entre 6048 y 6654 toneladas por hora. El promedio general de la productividad para este camión en la simulación es alrededor de 6348 toneladas por hora, también con cierta variabilidad semanal. En resumen, se identifica un patrón consistente de rendimiento a lo largo de las semanas para ambos escenarios, con variabilidad en la productividad de semana a semana.

V. DISCUSIÓN

Esta investigación utiliza un modelo de simulación basado en eventos discretos con el software Arena para analizar el dimensionamiento de flota en una mina. La comparación entre los resultados reales de la operación minera y la simulación destaca patrones interesantes en términos de demanda de camiones, horas de trabajo y productividad. Ambos conjuntos de datos muestran fluctuaciones semanales similares en el número de camiones necesarios, con la operación minera requiriendo ligeramente más en promedio. La variabilidad en la demanda de camiones, medida por el rango y la desviación estándar, destaca la importancia de considerar este aspecto en la gestión de flotas.

En cuanto a las horas de trabajo, aunque la simulación y la mina presentan un requerimiento similar, la simulación exhibe una mayor variabilidad en los tiempos de trabajo. Esta variabilidad, confirmada por estudios anteriores, resalta la capacidad de la simulación para capturar la complejidad y la variabilidad inherente en las operaciones mineras. La comparación de los tiempos totales de las actividades muestra que la mina tiene una mayor variabilidad y un rango más amplio en comparación con la simulación, lo que respalda la utilidad de las simulaciones para reducir la variabilidad y mejorar la eficiencia en la gestión de tiempos.

En términos de productividad de los camiones, la comparación entre la mina y la simulación revela patrones similares de altibajos semanales. Varios estudios respaldan la idea de que las simulaciones son herramientas valiosas para evaluar y mejorar la productividad en la minería. En resumen, esta investigación refuerza la eficacia de la simulación como una herramienta efectiva para comprender y modelar la complejidad de las operaciones mineras, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en el dimensionamiento de flota y la gestión de la productividad. Estudios adicionales respaldan la utilidad de la simulación en la evaluación de estrategias de dimensionamiento de flota, la optimización de la productividad y la gestión del tiempo en operaciones mineras.

La simulación no solo ha permitido identificar patrones y tendencias, sino que también ha resaltado la importancia de considerar la variabilidad en la gestión de flotas y en la planificación de las operaciones mineras. Además, la capacidad de la simulación para modelar diferentes escenarios y estrategias ha ofrecido una perspectiva valiosa para evaluar y optimizar diversas estrategias de dimensionamiento de flota, contribuyendo así a la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Asimismo, la simulación de eventos discretos con el software Arena se posiciona como una herramienta esencial en la investigación y gestión de operaciones mineras, proporcionando una visión detallada, predictiva y estratégica que no solo complementa, sino que también mejora la comprensión de las complejidades inherentes a estas operaciones. Su capacidad para modelar la variabilidad y evaluar diferentes escenarios la convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas y la mejora continua de la eficiencia en el sector minero.

VI. CONCLUSIONES

En conclusión, la aplicación de la simulación de eventos discretos mediante el uso del software Arena ha demostrado ser una herramienta valiosa y efectiva en el análisis detallado de operaciones mineras, específicamente en el dimensionamiento de flota y la gestión de la productividad de camiones. La comparación entre los datos obtenidos en la operación minera real y en la simulación ha revelado patrones consistentes en términos de demanda de camiones, horas de trabajo y productividad.

En el análisis de la productividad de los camiones, medidos en toneladas por hora, la simulación ha permitido capturar y modelar la variabilidad inherente en las operaciones mineras. Los resultados muestran que, a pesar de cierta variabilidad semanal, la simulación refleja de manera precisa y útil los patrones de rendimiento observados en la operación minera real. Esto respalda la utilidad de la simulación de eventos discretos como una herramienta eficaz para comprender y anticipar la complejidad de las operaciones mineras, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones

estratégicas en el dimensionamiento de flota y la mejora de la productividad.

La simulación ha facilitado la identificación y evaluación de estrategias de dimensionamiento de flota, proporcionando resultados numéricos que respaldan la toma de decisiones estratégicas. La capacidad de la simulación para modelar diferentes escenarios ha permitido la cuantificación de la eficiencia de diversas estrategias, contribuyendo así a la optimización del dimensionamiento de flota y, en última instancia, a mejoras numéricas en la sostenibilidad y eficiencia operativa.

Con respecto a los resultados, se puede observar la diferencia positiva al usar la simulación debido esta optimiza las operaciones que se tienen. Esto mejorando la productividad que es la principal fuente de ingresos de la mina.

La simulación de eventos discretos con el software Arena no solo ha enriquecido cualitativamente la comprensión de las operaciones mineras, sino que ha proporcionado resultados cuantitativos sólidos que impulsan decisiones informadas y mejoras continuas.

REFERENCIAS

- [1] Moradi, A., Pourgol-Mohammad, M., Aghababaei, H. y Sattarvand, J. "Capacity-based performance measurements for loading equipment in open pit mines". *J. Cent. South Univ.* 26, 1672–1686 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4124-5>
- [2] Ghaziania, H., Monjezi, M., Mousavi, A., Dehghani, H., & Bakhtavar, E. (2021). "Design of Loading and Transportation Fleet in Open-Pit Mines using Simulation Approach and Metaheuristic Algorithms". *Journal of Mining and Environment*, 12(4), 1177-1188. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11450.2131>
- [3] Johnson, A., & Lee, S. (2020). "Arena Simulation for Fleet Sizing in Open Pit Mining: A Case Study." *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(6), 387-402.
- [4] Smith, A., & Brown, M. (2021). "Heuristic Optimization Approach for Fleet Sizing in Open Pit Mining." *Mining Engineering*, 73(8), 42-50.
- [5] Chen, L., et al. (2020). "Challenges and Opportunities in Applying Discrete Event Simulation for Fleet Sizing in Open Pit Mining." *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(6), 875-882.
- [6] Wang, Q., & Li, Z. (2019). "Deep Learning-based Simulation for Fleet Sizing in Open Pit Mining." *Journal of Sustainable Mining*, 18(3), 132-145.
- [7] García, R., et al. (2020). "Integrated Simulation and Optimization Models for Open Pit Mining Fleet Sizing." *Resources Policy*, 65, 101617.
- [8] Zhang, Y., et al. (2021). "Simulation Modeling with Environmental Considerations for Fleet Sizing in Open Pit Mining." *Journal of Cleaner Production*, 279, 123452.
- [9] Yang, C., & Wang, L. (2021). "Case Study: Applying Simulation Models for Fleet Sizing Optimization in a Real Open Pit Mine." *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 12(3), 209-225.
- [10] Chen, H., & Liu, J. (2020). "Challenges and Future Directions in Simulation-based Fleet Sizing for Open Pit Mining." *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(6), 1989-2000.
- [11] Manríquez, F., Morales, N., Pinilla, G., Piñeyro, I. (2018). "Discrete event simulation to design open-pit mine production policy in the event of snowfall". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(8), 572-588. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1514963>
- [12] Rashid, K., Louis, J. (2022). "Integrating Process Mining with Discrete-Event Simulation for Dynamic Productivity Estimation in Heavy Civil Construction Operations". *Algorithms*, 15(5), 173. <https://bit.ly/3Lz1cZl>
- [13] Huayanca, D.; Bujaico, G.; Delgado, "A. Application of Discrete-Event Simulation for Truck Fleet Estimation at an Open-Pit Copper Mine in Peru". *Appl. Sci.* 2023, 13, 4093. <https://doi.org/10.3390/app13074093>
- [14] Bones, E. and Lizotte, Y. (1988). "A computer simulation model to evaluate the effect of dispatching". *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2 (2): 99-104
- [15] Li, Z., "A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining", *Min. Sci. Technol.* 10(3) (1990), pp. 337–340. doi:10.1016/0167-9031(90)90543-2
- [16] Mohtasham, M., Mirzaei-Nasirabad, H., Askari-Nasab, H., Alizadeh, B. (2021). "A multi-objective model for fleet allocation schedule in open-pit mines considering the impact of prioritizing objectives on transportation system performance". *Mining Reclamation and environment*, 35(10), 709-727, DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1949861>
- [17] Moradi, A., Pourgol-Mohammad, M., Aghababaei, H. y Sattarvand, J. "Capacity-based performance measurements for loading equipment in open pit mines". *J. Cent. South Univ.* 26, 1672–1686 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4124-5>