

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



TESIS:

**Implementación de una metodología integradora de
simulación de procesos para abordar interferencias
operacionales en el carguío y acarreo en la Unidad Minera
Cerro Lindo 2023**

Para optar el título profesional de:

INGENIERA DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Ana Orfelinda ALEGRIA RINCON

ASESOR:

Ing. Grover RUBINA SALAZAR

AYACUCHO - PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mis padres por educarme, por guiarme por la vida y formarme como una persona de solidos valores, por amarme y enseñar a amar, por motivarme y apoyarme en todos los aspectos de mi vida, ellos son mi mayor inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Al ing. Grover Rubina Salazar por el tiempo dedicada, en la asesoría de la presente tesis.

A los estimados docentes y autoridades de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por brindarme su enseñanza y guiarme profesionalmente.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	X
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS	3
1.3.1. Hipótesis general.....	3
1.3.2. Hipótesis específicas.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6. VIABILIDAD DE ESTUDIO	5
1.7. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.8. OPERACIONALIDAD DE VARIABLES	7
CAPITULO II.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1. GENERALIDADES.....	10
2.1.1. Antecedentes de la empresa.....	10
2.1.2. Ubicación y accesibilidad.....	11
2.1.3. Clima y vegetación	12
2.1.4. Fisiografía.....	14
2.1.5. Recursos	16
2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.3. MARCO CONCEPTUAL	23
2.3.5. Procesos en la simulación.....	33
2.3.6. Software de simulación.....	34
2.3.7. Aplicación del software de simulación.....	35
2.3.8. Interferencias en la preparación minera	37
2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	40
CAPITULO III.....	42
IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADORA DE SIMULACIÓN DE PROCESOS PARA ABORDAR INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN EL CARGUÍO Y ACARREO	42
3.1. INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO.....	42
3.1.1. Importancia de Identificar y Mitigar Interferencias.....	42

3.1.2.	<i>Descripción del Sistema de Carguío y Acarreo.....</i>	42
3.1.3.	<i>Tipos de Interferencias Operacionales en el Sistema de Carguío y Acarreo</i>	43
3.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	44
3.2.1.	<i>Recolección de Datos en Campo</i>	44
3.3.	ANÁLISIS DE DATOS	45
3.3.1.	<i>Implementación del Software Arena.....</i>	46
3.3.2.	<i>Análisis Estadístico.....</i>	47
3.3.3.	<i>Validación del Modelo de Simulación</i>	47
3.3.4.	<i>Desarrollo del Modelo de Simulación</i>	48
CAPITULO IV		56
MATERIALES Y METODOLOGÍA		56
4.1.	MATERIALES.....	56
4.2.	METODOLIGÍA.....	58
4.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	59
4.4.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO DE LAS INTERFERENCIAS OPERACIONALES.	60
4.5.	ANALISIS DE DATOS	61
CAPITULO V		62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
5.1.	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	62
5.1.1.	<i>Interferencias operacionales que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023</i>	65
5.1.2.	<i>Interferencias operacionales el costo del sistema de carguío y acarreo</i>	67
5.1.3.	<i>Implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo.....</i>	70
5.1.4.	<i>Parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.....</i>	71
5.1.5.	<i>Ciclo de Minado</i>	73
5.1.6.	<i>Evaluación de Costos y Productividad.....</i>	76
5.1.7.	<i>Simulación de Procesos.....</i>	77
5.1.8.	<i>Análisis de Eficiencia y Productividad.....</i>	79
5.1.9.	<i>Impacto de las Interferencias</i>	80
5.2.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	85
5.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	89
CONCLUSIONES.....		92
RECOMENDACIONES		94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		95
ANEXO		98
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....		99
TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADORA DE SIMULACIÓN DE PROCESOS PARA ABORDAR INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN LA PREPARACIÓN MINERA EN LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO 2023		99
.....		99
ANEXO 2: MODELO DE SIMULACIÓN.....		100
.....		100

ANEXO 3: REPORTES	101
--------------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°1: VEGETACIÓN TÍPICA EN LA ZONA DE CERRO LINDO.	14
FIGURA N°2: ETAPAS DE APLICACIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	36
FIGURA N°3: CREACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN	37
FIGURA N°4: CONFIGURACIÓN INICIAL DEL MODELO.....	48
FIGURA N°5: ASIGNACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO EN LA SIMULACIÓN	49
FIGURA N°6: CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CARGUÍO DE MATERIAL	50
FIGURA N°7: CONDICIÓN PARA EL CARGUÍO DE MATERIAL A LOS VOLQUETES.....	50
FIGURA N°8: CONDICIÓN DE PARADAS OPERATIVAS	51
FIGURA N°9: CONDICIÓN DE ESPERAS O COLAS	52
FIGURA N°10: CONDICIONES PARA LIBERAR USO DE EQUIPOS	53
FIGURA N°11: MÓDULO DE DECISIÓN PARA RETORNO A PRINCIPIO DE SIMULACIÓN	54
FIGURA N°12: SISTEMA LIBERA RECURSOS DE LA SIMULACIÓN.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1: PARÁMETROS OPERATIVOS DE LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO.....	10
TABLA N° 2: DISTANCIAS Y ACCESIBILIDAD A LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO.....	12
TABLA N° 3: PARÁMETROS CLIMÁTICOS DE LA REGIÓN DE CERRO LINDO	13
TABLA N° 4: CARACTERÍSTICAS FISIográfICAS DE LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO	15
TABLA N° 5: PRINCIPALES RECURSOS MINERALES DE CERRO LINDO	16
TABLA N° 6: INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN LA UNIDAD MINERA DE CERRO LINDO.....	38
TABLA N° 7: PROBLEMAS DE LOGÍSTICA IDENTIFICADOS EN LA UNIDAD MINERA DE CERRO LINDO.....	39
TABLA N° 8: MODELO DE TABLA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO	45
TABLA N° 9: CRONOGRAMA DE IMPLEMENTACIÓN.....	46
TABLA N° 10: FRECUENCIA DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN EL SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO	
TABLA N° 11: : IMPACTO DE INTERFERENCIAS EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CARGUÍO Y ACARREO	67
TABLA N° 12: COSTOS DIRECTOS ASOCIADOS A INTERFERENCIAS OPERACIONALES	68
TABLA N° 13: COSTOS INDIRECTOS ASOCIADOS A INTERFERENCIAS OPERACIONALES ..	69
TABLA N° 14: COMPARACIÓN DE MÉTODOS TRADICIONALES VS. SIMULACIÓN CON ARENA	71
TABLA N° 15: PARÁMETROS CLAVE PARA EL MODELO DE SIMULACIÓN	72
TABLA N° 16: TIEMPOS DE CICLO DE CARGUÍO Y ACARREO	73
TABLA N° 17: CAPACIDAD DE TRANSPORTE POR CICLO DE ACARREO.....	74
TABLA N° 18: EFICIENCIA DEL CICLO DE CARGUÍO CON SCOOP	74
TABLA N° 19: FACTOR DE ESPONJAMIENTO DEL MATERIAL	75
TABLA N° 20: COSTOS OPERATIVOS POR ETAPA DEL CICLO DE MINADO	76
TABLA N° 21: PRODUCTIVIDAD POR ETAPA DEL CICLO DE MINADO	76
TABLA N° 22: PARÁMETROS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN EN ARENA.....	77
TABLA N° 23: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA DIFERENTES ESCENARIOS	79
TABLA N° 24: ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO	80
TABLA N° 25: REDUCCIÓN DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES	80
TABLA N° 26: UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO	81
TABLA N° 27: EVALUACIÓN DE COSTOS DE OPTIMIZACIÓN	82
TABLA N° 28: ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS	83
TABLA N° 29: COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN	83
TABLA N° 30: INDICADORES DE RENDIMIENTO CLAVE (KPI) DE LA OPERACIÓN	84
TABLA N° 31: PRUEBA DE NORMALIDAD INTERFERENCIAS OPERACIONALES MÁS SIGNIFICATIVAS	85
TABLA N° 32: PRUEBA T PARA MUESTRAS RELACIONADAS	85

TABLA N° 33: PRUEBA DE NORMALIDAD IMPACTO ECONÓMICO DE LAS INTERFERENCIAS	86
TABLA N° 34: PRUEBA ANOVA	86
TABLA N° 35: PRUEBA DE NORMALIDAD EFICIENCIA DE LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL CON ARENA.....	87
TABLA N° 36: PRUEBA T PARA MUESTRAS INDEPENDIENTES	87
TABLA N° 37: PRUEBA DE NORMALIDAD PARÁMETROS CLAVE EN EL MODELO DE SIMULACIÓN	88
TABLA N° 38: PRUEBA DE CORRELACIÓN	88

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo evaluar de qué manera las interferencias operacionales afectan al sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo. Para abordar este objetivo, se desarrolló una metodología integradora de simulación de procesos utilizando el software Arena v16.2. El estudio se centró en identificar y cuantificar las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. Se recopiló y analizó información de campo, incluyendo tiempos de ciclo, tiempos de espera y fallas en los equipos. Además, se evaluaron diferentes escenarios operativos para determinar las mejores estrategias de mitigación y optimización. Los resultados de la simulación mostraron que las interferencias operacionales, como las Retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas) y averías de equipos, tienen un impacto significativo en la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. La implementación de medidas de mitigación logró una reducción del tiempo promedio de ciclo de 30 minutos a 27 minutos, representando una mejora del 10%, y un incremento en la tasa de utilización de equipos del 85% al 92%, lo que equivale a una mejora del 8%. Además, la frecuencia de las interferencias se redujo entre un 30% y un 40%, lo que permitió disminuir los costos operativos por tonelada de 20 USD a 18 USD, una reducción del 10%, y los costos totales de operación de 100,000 USD a 85,000 USD, lo que representa una reducción del 15%. Las conclusiones indican que, las interferencias operacionales identificadas son factores críticos que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. La simulación permitió cuantificar estos impactos y desarrollar estrategias para mitigar sus efectos negativos, la metodología de simulación con Arena v16.2 demostró ser una herramienta eficaz para mejorar la eficiencia operativa, aumentando la producción promedio de 55 toneladas por hora a 60 toneladas por hora, lo que representa un incremento del 9%, y reduciendo el tiempo promedio de ciclo de 30 minutos a 27 minutos, logrando una reducción del 10%, la correcta gestión de parámetros clave como el tiempo de llegada de volquetes, tiempo de carguío, capacidad de los volquetes y densidad del material, permitió aumentar la disponibilidad de equipos del 90% al 95%, una mejora del 5%, y reducir la tasa de fallas de equipos del 10% al 8%, lo que representa una reducción del 20%.

Palabras clave: Simulación, Carguío y acarreo, minería, productividad, eficiencia.

INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta desafíos significativos a nivel mundial y nacional, los cuales incluyen la creciente demanda de recursos minerales, la complejidad geológica de los yacimientos y las presiones ambientales y regulatorias en constante evolución. En Perú, el sector minero desempeña un papel crucial en la economía, proporcionando recursos esenciales para el desarrollo industrial y económico. Sin embargo, la eficiencia operativa se ve amenazada por la variabilidad en la calidad y cantidad de los depósitos minerales y la necesidad de adaptarse a estándares ambientales cada vez más estrictos.

En este contexto, la optimización de las estrategias de preparación minera mediante la implementación de simulación de procesos se presenta como una necesidad imperante. La simulación permite modelar y analizar virtualmente diferentes escenarios operativos, anticipando posibles desafíos y evaluando estrategias antes de su implementación práctica. Esto no solo contribuye a mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras, sino que también facilita la toma de decisiones informada y la adaptación continua a las cambiantes condiciones del entorno.

La presente tesis, titulada “Implementación de una Metodología Integradora de Simulación de Procesos para Abordar Interferencias Operacionales en el Carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023”, tiene como objetivo principal proponer una metodología para optimizar estrategias de preparación minera que incorpore interferencias operacionales mediante la implementación de simulación de procesos. Esta metodología se aplicará en la Unidad Minera Cerro Lindo, la cual enfrenta desafíos específicos debido a su complejidad geológica y la variabilidad en la calidad del mineral.

El estudio se centrará en el análisis de las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo, así como en la implementación de la simulación computacional mediante el software Arena v162 para evaluar y optimizar dichos procesos. Además, se identificarán y cuantificarán las interferencias operacionales específicas en la Unidad Minera Cerro Lindo y se establecerán los parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación.

La importancia de esta investigación radica en su potencial para mejorar la planificación, ejecución y control de las operaciones mineras, lo que se traducirá en beneficios tangibles como una mayor productividad, reducción de costos y una gestión más eficiente de los

recursos. Al integrar la simulación de procesos como una herramienta de análisis y optimización, se espera proporcionar una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la preparación minera y contribuir al desarrollo sostenible del sector minero en Perú.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La optimización de estrategias de preparación minera a través de la implementación avanzada de simulación de procesos se presenta como una necesidad imperante en el contexto mundial y nacional de la minería. A nivel global, la industria minera enfrenta desafíos significativos relacionados con la creciente demanda de recursos minerales, la complejidad geológica de los yacimientos, y las presiones ambientales y regulatorias en constante evolución (Castillo, 2015). En este mismo sentido, en la actualidad, uno de los mayores desafíos para las empresas en todo el mundo es ser altamente competitivos, confrontar el desarrollo de mercados globales con estándares cada vez más rigurosos. Por lo tanto, las empresas buscan la forma más eficiente de cómo supervisar y administrar sus operaciones, siendo la gestión de existencias uno de los factores componentes claves para el logro de la competitividad y rentabilidad de la empresa (Cinco Días, 2015, p.1).

En el ámbito nacional, el sector minero desempeña un papel crucial en la economía, proporcionando recursos esenciales para el desarrollo industrial y económico. Sin embargo, la eficiencia operativa se ve amenazada por la variabilidad en la calidad y cantidad de los depósitos minerales, así como por la necesidad de adaptarse a estándares ambientales cada vez más estrictos. Es así que la gran complejidad y diversidad de proyectos mineros generan una vasta necesidad de nuevas soluciones tecnológicas que permitan facilitar el trabajo en todos los eslabones de la cadena de producción (Van Niekerk, Kleingeld & Booysen 2013). Aquí es donde las herramientas tecnológicas, en particular los softwares diseñados para el desarrollo de proyectos mineros, y en especial los softwares de simulación, tienen la oportunidad de acercarse a esos requerimientos y buscar métodos innovadores para satisfacerlos, ofreciendo productos y servicios que aporten a los procesos mineros y permitan agregarles valor y mejorar la eficiencia productiva. La simulación ha sido ampliamente utilizada para examinar problemas de minería a cielo abierto y subterráneo (Newman et al. 2010; Vásquez Coronado & Tenorio 2015). Encontrar el funcionamiento óptimo de un proceso constituye una tarea de gran

complejidad. Esto se debe a la gran cantidad de variables que se presentan en todos los ámbitos de la actividad minera (Hudson 2003), como por ejemplo en el proceso de optimizar el cálculo de la capacidad de almacenamiento de una tolva o de un stock pile para obtener la productividad deseada. Cuando se trabaja con este tipo de problema (con muchas variables) una buena práctica es efectuar cálculos iterativos que permiten encontrar una “solución provisoria”. Posteriormente, al poner en funcionamiento el sistema y realizar las mejoras necesarias en base a los resultados obtenidos, se puede alcanzar la “solución óptima”.

En particular, la Unidad Minera Cerro Lindo, como representante de la realidad nacional, enfrenta desafíos específicos que requieren enfoques innovadores. La complejidad geológica y la variabilidad en la calidad del mineral plantean obstáculos para la planificación y ejecución efectivas de las operaciones mineras. En este contexto la implementación avanzada de simulación de procesos se presenta como una solución prometedora para abordar estas problemáticas. Permite modelar y analizar virtualmente diferentes escenarios operativos, anticipando posibles desafíos y evaluando estrategias antes de su implementación práctica. Esto no solo contribuye a mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras, sino que también facilita la toma de decisiones informada y la adaptación continua a las cambiantes condiciones del entorno.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. *Problema general.*

¿De qué manera las interferencias operacionales afectan al sistema de carguío y acarreo, en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023?

1.2.2. *Problemas específicos.*

- ¿Cuáles son las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023?
- ¿Cómo afecta las interferencias operacionales el costo del sistema de carreo y carguío?

- ¿Cuál es la razón para la implementación de la simulación computacional de Arena v16,2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo?
- ¿Cuáles son los parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023?

1.3. PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS

1.3.1. *Hipótesis general.*

Las interferencias operacionales tienen un impacto negativo significativo en la eficiencia del sistema de carguío y Acarreo en unidad Minera Cerro Lindo, 2023.

1.3.2. *Hipótesis específicas.*

- Existe una variedad de interferencias operacionales significativas que afectan la eficiencia operativa carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo.
- Es posible identificar y cuantificar de manera precisa las interferencias operacionales mediante un análisis detallado de los costos del sistema de carreo y carguío.
- Es factible adaptar o desarrollar una metodología de simulación de procesos que pueda abordar de manera específica las interferencias operacionales identificadas en la preparación minera de la Unidad Minera Cerro Lindo.
- La consideración cuidadosa de parámetros durante el desarrollo del modelo de simulación, será esencial para lograr resultados precisos y aplicables a la realidad de la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. *Objetivo general.*

Evaluar las interferencias operacionales en la eficiencia del sistema de carguío y acarreo, en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Determinar las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023
- Evaluar cómo afecta las interferencias operacionales el costo del sistema de carreo y carguío
- Demostrar la implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo.
- Establecer los parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. Justificación teórica

La implementación de una metodología integradora de simulación de procesos en la preparación minera de la Unidad Minera Cerro Lindo en 2023 se justifica teóricamente por la necesidad de avanzar en la comprensión y gestión de las complejas interacciones operacionales que influyen en el rendimiento minero. La teoría respalda la idea de que la simulación de procesos es una herramienta eficaz para modelar y analizar escenarios complejos, permitiendo una evaluación detallada de las interferencias operacionales. Al integrar esta metodología, se busca mejorar la toma de decisiones estratégicas basadas en datos precisos y en la comprensión profunda de los factores que afectan la preparación minera.

1.5.2. Justificación práctica

Desde un punto de vista práctico, la implementación de esta metodología responde a las demandas y desafíos específicos que enfrenta la Unidad Minera Cerro Lindo en 2023. La práctica actual revela la presencia de interferencias operacionales que afectan la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras. La simulación de procesos ofrece la oportunidad práctica de identificar, cuantificar y abordar estas interferencias de manera proactiva. Al adoptar esta metodología, se espera mejorar la planificación, ejecución y

control de las operaciones mineras, lo que se traducirá en beneficios tangibles, como una mayor productividad, reducción de costos y una gestión más eficiente de los recursos.

1.5.3. Justificación metodológica

La elección de la simulación de procesos como metodología se sustenta en la necesidad de desarrollar un enfoque sistemático y riguroso para abordar las interferencias operacionales en la preparación minera. Esta metodología proporcionará una estructura robusta para la modelización y simulación de escenarios complejos, permitiendo la visualización de resultados y la identificación de soluciones óptimas. La aplicación metódica de la simulación de procesos en la Unidad Minera Cerro Lindo permitirá evaluar la viabilidad y eficacia de las estrategias propuestas, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones informada y la mejora continua de las prácticas operativas en el ámbito de la preparación minera.

1.6. Viabilidad de estudio

Factores que justifican la viabilidad del estudio:

- **Acceso a Datos Específicos y Representativos:** El estudio se basa en datos empíricos obtenidos directamente de la operación en la Unidad Minera Cerro Lindo, garantizando la relevancia y exactitud de la información. Esto permite un análisis detallado y una modelización precisa del sistema de carguío y acarreo.
- **Infraestructura Tecnológica Avanzada:** La disponibilidad y uso del software de simulación Arena v16.2 asegura una modelización robusta y confiable de los procesos mineros, permitiendo replicar escenarios operativos con alta fidelidad y analizar sus resultados de manera detallada.
- **Importancia Estratégica del Estudio:** La optimización de procesos operativos es crucial para mantener la competitividad y sostenibilidad en la industria minera, especialmente en contextos geológicos complejos y bajo presión económica y regulatoria.

1.7. Variables de la investigación

1.7.1. Variables Independientes:

- a. Interferencias Operacionales: Factores disruptivos que impactan negativamente el rendimiento del sistema de carguío y acarreo, como demoras en el ciclo operativo, fallas mecánicas de equipos, y variabilidad en la llegada de insumos críticos.
 - Subvariables:
 - Tiempo de Inactividad por Falla de Equipos: Tiempo total en minutos durante el cual los equipos están fuera de operación debido a fallas.
 - Demoras en la Cadena de Suministro: Retrasos en la entrega de insumos necesarios para la continuidad operativa.
 - Congestión y Espera de Volquetes: Tiempos de espera adicionales debido a congestión en puntos críticos del proceso.

1.7.2. Variables Dependientes:

a. Eficiencia del Sistema de Carguío y Acarreo:

- Definición Técnica: Capacidad del sistema para maximizar la cantidad de material transportado y minimizar el tiempo de ciclo y los costos operativos, asegurando una operación continua y sin interrupciones.
- Indicadores:
 - Tiempo Promedio de Ciclo (minutos): Medido desde el inicio del carguío hasta la descarga final del material.
 - Utilización de Equipos (%): Porcentaje de tiempo en que los equipos están en operación efectiva respecto al tiempo total disponible.
 - Productividad del Sistema (toneladas/hora): Volumen de material transportado por hora, reflejando la eficiencia del sistema.

b. Costo Operativo del Sistema:

- Definición Técnica: Suma de todos los gastos asociados a la operación del sistema de carguío y acarreo, considerando tanto los costos directos (mano de obra, combustibles, mantenimiento) como los costos indirectos (tiempo de inactividad, demoras en la producción).
- Indicadores:
 - Costo Unitario por Tonelada (USD/tonelada): Costo total dividido por el volumen total de material transportado.
 - Costo Total Operativo (USD): Suma total de todos los gastos asociados al ciclo operativo durante el periodo de análisis.

1.8. Operacionalidad de variables

Interferencias Operacionales (Variable Independiente):

- Definición Conceptual: Elementos que generan interrupciones o ineficiencias en el ciclo operativo de carguío y acarreo, impidiendo el flujo óptimo de material.
 - Definición Operacional:
 - Tiempo de Inactividad por Falla de Equipos: Registrado en minutos por día y analizado como porcentaje del tiempo total operativo.
 - Demoras en la Cadena de Suministro: Medido en horas o días de retraso respecto a los tiempos planificados.
 - Congestión y Espera de Volquetes: Medido en minutos de espera adicionales en puntos de congestión, registrado para cada ciclo.
- Indicadores:

Eficiencia del Sistema de Carguío y Acarreo (Variable Dependiente):

- Definición Conceptual: Medida de la efectividad con la que el sistema realiza su función principal de mover material desde el punto de extracción hasta el punto de procesamiento o almacenamiento, minimizando el tiempo y maximizando el rendimiento.

- Definición Operacional:
 - Tiempo Promedio de Ciclo (minutos): Promedio de la duración total de un ciclo de carguío y acarreo, medido con precisión en cada operación simulada.
 - Utilización de Equipos (%): Calculado como el porcentaje del tiempo total operativo durante el cual los equipos están activos y en funcionamiento, basado en registros y simulaciones.
 - Productividad del Sistema (toneladas/hora): Medido como el total de toneladas transportadas dividido por el tiempo total operativo. Costo por tonelada transportada (USD/tonelada).

Costo Operativo del Sistema (Variable Dependiente):

- Definición Conceptual: Costos incurridos directamente en la operación del sistema de carguío y acarreo, incluyendo tanto costos fijos como variables, y cómo estos se ven influenciados por las interferencias operacionales.
- Definición Operacional:
 - Costo Unitario por Tonelada (USD/tonelada): Calculado como el costo total operativo dividido por el total de toneladas transportadas.
 - Costo Total Operativo (USD): Sumatoria de todos los costos registrados en el periodo de análisis, incluyendo mano de obra, mantenimiento, y tiempo de inactividad debido a interferencias.

1.9 Variables de la investigación

Variables Independientes:

Interferencias Operacionales: Son los factores externos e internos que generan interrupciones o afectan negativamente el rendimiento del sistema de carguío y acarreo. Los indicadores que se utilizarán para medir estas interferencias son:

Tiempo de inactividad por falla de equipos (minutos/día): Este indicador mide el tiempo total que los equipos están fuera de operación debido a fallas mecánicas o técnicas.

Demoras en la cadena de suministro (horas o días): Mide el retraso en la entrega de insumos críticos, como pernos, mallas y otros materiales, comparado con el tiempo planificado.

Congestión y espera de volquetes (minutos/ciclo): Mide los tiempos adicionales de espera en puntos críticos del proceso de acarreo debido a la congestión, afectando el flujo continuo de la operación.

Variables Dependientes:

Eficiencia del Sistema de Carguío y Acarreo: Refleja la capacidad del sistema para maximizar el rendimiento operativo, minimizando el tiempo y los costos. Los indicadores principales son:

Tiempo promedio de ciclo (minutos/ciclo): Mide la duración total de un ciclo completo de carguío y acarreo, desde el inicio hasta la descarga del material. Un menor tiempo de ciclo indica mayor eficiencia operativa.

Utilización de equipos (%): Calcula el porcentaje de tiempo efectivo que los equipos están en operación en comparación con el tiempo total disponible. Un mayor porcentaje refleja una mejor utilización y menor tiempo de inactividad.

Productividad del sistema (toneladas/hora): Mide la cantidad de material transportado por hora, lo que permite evaluar la eficiencia de los equipos y del proceso en general.

Costo Operativo del Sistema: Se refiere a los costos totales asociados al sistema de carguío y acarreo, incluyendo tanto costos directos como indirectos. Los indicadores asociados son:

Costo unitario por tonelada (USD/tonelada): Este indicador refleja el costo promedio de transportar una tonelada de material, considerando todos los costos involucrados en el ciclo operativo. Un menor costo unitario indica una mayor eficiencia económica.

Costo total operativo (USD): Suma todos los costos directos e indirectos asociados a la operación del sistema de carguío y acarreo durante el periodo de análisis. Este indicador permite evaluar la efectividad de las estrategias implementadas para reducir costos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES

2.1.1. *Antecedentes de la empresa*

La Unidad Minera Cerro Lindo, propiedad de Compañía Minera Nexa Resources., es una de las operaciones mineras subterráneas de mayor relevancia en el sector minero peruano, destacándose no solo por su alta eficiencia operativa, sino también por su compromiso con las prácticas sostenibles y la responsabilidad social. La mina inició sus operaciones en el año 2007 bajo la dirección del Ing. Carlos Contreras, quien ha desempeñado un papel clave en la consolidación de Cerro Lindo como una operación modelo dentro del portafolio de Nexa Resources.

La capacidad de procesamiento instalada en Cerro Lindo es de 20,000 toneladas por día, lo que la convierte en una de las plantas de procesamiento más grandes del país. La operación subterránea se lleva a cabo utilizando el método de corte y relleno, permitiendo una explotación eficiente de los cuerpos mineralizados. Este método ha demostrado ser eficaz en la maximización de la recuperación del mineral, minimizando simultáneamente la dilución y las pérdidas de mineral.

El proceso de beneficio en Cerro Lindo incluye trituración, molienda, flotación y espesamiento, para la obtención de concentrados de zinc, cobre, y plomo, que luego son transportados a los puertos para su exportación. La eficiencia de estos procesos ha sido optimizada a través de la implementación de tecnologías de punta y la formación continua del personal.

Tabla N° 1: Parámetros Operativos de la Unidad Minera Cerro Lindo

Parámetro Operativo	Valor
Capacidad de procesamiento	20,000 toneladas/día
Método de explotación	Corte y relleno
Recuperación de Zinc	92%
Recuperación de Cobre	87%
Recuperación de Plomo	85%

Desde sus inicios, Cerro Lindo ha mantenido un firme compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad social, integrando prácticas ambientales y sociales en su operación diaria. Entre las iniciativas más destacadas se encuentran los programas de manejo de recursos hídricos, que incluyen la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y la implementación de sistemas de recirculación de agua para reducir el consumo de recursos hídricos frescos.

Además, Cerro Lindo ha establecido sólidas relaciones con las comunidades locales, promoviendo el desarrollo social y económico a través de la creación de empleos directos e indirectos, y la implementación de programas de educación, salud y desarrollo de capacidades. Estas acciones han fortalecido la relación de la empresa con las comunidades aledañas, convirtiéndose en un referente de minería responsable en el país.

A lo largo de su operación, Cerro Lindo ha sido reconocida tanto a nivel nacional como internacional por sus buenas prácticas operativas y su compromiso con la seguridad y el medio ambiente. La empresa ha obtenido certificaciones importantes como ISO 14001, que avala su gestión ambiental, y OHSAS 18001, que certifica sus altos estándares en salud y seguridad ocupacional.

En adición, la Unidad Minera Cerro Lindo ha sido galardonada con premios como "Empresa Socialmente Responsable" otorgado por el Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI) y "Premio Nacional de Minería" en diversas ediciones, lo que reafirma su posición como líder en la industria minera peruana.

2.1.2. Ubicación y accesibilidad

Cerro Lindo se localiza en el distrito de Chavín, provincia de Chincha, en el departamento de Ica, a una altitud aproximada de 1,850 metros sobre el nivel del mar. La ubicación geográfica de la mina ofrece una ventaja estratégica en términos de logística, facilitando el transporte de los concentrados de minerales hacia los principales puertos de exportación ubicados en la costa peruana.

La mina es accesible a través de la carretera Panamericana Sur, seguida de un desvío a la altura del kilómetro 240, que conecta con una vía secundaria de aproximadamente 45 kilómetros que lleva directamente al campamento minero. Este acceso, aunque desafiante debido a la topografía accidentada de la región, ha sido optimizado a través de la

pavimentación y mantenimiento continuo, asegurando un flujo constante de insumos y productos.

Tabla N° 2:Distancias y Accesibilidad a la Unidad Minera Cerro Lindo

Punto de Referencia	Distancia (km)	Tiempo Aproximado (hrs)
Lima	240	5
Pisco	180	4
Chincha Alta	90	2.5

2.1.3. Clima y vegetación

La Unidad Minera Cerro Lindo se encuentra en una región con un clima predominantemente semiárido, típico de las zonas costeras y andinas del Perú. Este clima está caracterizado por temperaturas moderadas a lo largo del año, con una marcada diferencia entre las estaciones secas y húmedas, lo cual influye directamente en las operaciones mineras y en la vegetación local.

Clima

La región donde se ubica Cerro Lindo presenta una variación altitudinal significativa, lo que genera diferencias microclimáticas que impactan tanto en las actividades mineras como en las condiciones de vida del personal. La temperatura promedio anual oscila entre los 16°C y 24°C, con mínimas de 10°C durante la temporada de invierno (junio a agosto) y máximas que pueden superar los 28°C en el verano (diciembre a marzo).

La precipitación anual es moderada, con un promedio de 200 a 400 mm, concentrándose principalmente entre los meses de diciembre y marzo, correspondientes a la temporada de lluvias. Este periodo puede ocasionar desafíos operativos, como la generación de flujos de agua superficial que requieren una adecuada gestión para evitar inundaciones en las zonas de operación y asegurar la estabilidad de los taludes.

Tabla N° 3: Parámetros Climáticos de la Región de Cerro Lindo

Parámetro Climático	Valor Promedio Anual
Temperatura Mínima	10°C
Temperatura Máxima	28°C
Precipitación Anual	200 - 400 mm
Humedad Relativa	60% - 80%
Velocidad del Viento	5 - 15 km/h

Vegetación

La vegetación en la zona de Cerro Lindo es escasa debido a las condiciones semiáridas y a la altitud. Sin embargo, se pueden encontrar especies adaptadas a este ambiente, principalmente de tipo xerófilo, que son capaces de sobrevivir con poca agua y en suelos pobres en nutrientes.

Entre las especies vegetales más comunes se encuentran arbustos bajos, cactáceas, y algunas gramíneas que cubren las áreas más planas y protegidas del viento. La vegetación nativa ha sido históricamente utilizada por las comunidades locales para actividades tradicionales como el pastoreo de ganado menor, especialmente de cabras y ovejas, que se adaptan bien a estas condiciones.

La empresa ha implementado programas de reforestación y revegetación en áreas perturbadas por la actividad minera, utilizando especies nativas y otras especies adaptadas a las condiciones locales. Estos programas no solo buscan mitigar el impacto ambiental, sino también contribuir a la estabilización de suelos y la recuperación de ecosistemas degradados. Como parte de estos esfuerzos, se ha promovido el cultivo de especies como la Tara (*Caesalpinia spinosa*) y el Molle (*Schinus molle*), que son resistentes a la sequía y pueden prosperar en suelos pobres, además de tener un valor económico para las comunidades locales.

Figura N°1: Vegetación Típica en la Zona de Cerro Lindo.



2.1.4. Fisiografía

La fisiografía de la Unidad Minera Cerro Lindo se caracteriza por una topografía montañosa que forma parte de la Cordillera de los Andes, una de las cadenas montañosas más prominentes y extensas del mundo. La mina se encuentra a una altitud que varía entre los 1,800 y 2,200 metros sobre el nivel del mar, dentro del distrito de Chavín, provincia de Chincha, en el departamento de Ica. Este entorno geográfico presenta desafíos únicos para las operaciones mineras, así como ventajas en términos de acceso a recursos minerales de alta ley.

Relieve y Morfología

El relieve de la zona es altamente accidentado, con pendientes pronunciadas que oscilan entre 30° y 50°. La morfología del terreno está dominada por valles profundos y angostos,

intercalados con lomas y cumbres abruptas que se elevan de forma marcada sobre el paisaje circundante. Estas características son típicas de los terrenos andinos, donde los procesos tectónicos y erosivos han moldeado un terreno complejo y fragmentado.

Las formaciones montañosas en la región están compuestas principalmente por rocas sedimentarias e intrusivas, que han sido deformadas por la actividad tectónica a lo largo de millones de años. Los picos más altos en la proximidad de la mina pueden superar los 2,200 metros, mientras que las zonas más bajas corresponden a los fondos de valle donde se acumulan sedimentos fluviales.

Tabla N° 4: Características Fisiográficas de la Unidad Minera Cerro Lindo

Característica Fisiográfica	Descripción
Altitud	1,800 - 2,200 metros sobre el nivel del mar
Pendiente	30° - 50°
Tipo de relieve	Montañoso con valles profundos y cumbres abruptas
Composición del suelo	Rocas sedimentarias e intrusivas

Hidrografía y Drenaje

La red de drenaje en la zona de Cerro Lindo es densa y está conformada por cursos de agua estacionales que se alimentan principalmente durante la temporada de lluvias. Estos arroyos y quebradas fluyen hacia los valles, donde eventualmente desembocan en ríos más grandes que dirigen las aguas hacia la cuenca del Pacífico. El sistema de drenaje presenta un patrón dendrítico típico, con afluentes que se unen en ángulos agudos, siguiendo las líneas de mayor pendiente del terreno.

La fisiografía montañosa y el tipo de suelo en la región influyen en la velocidad y el volumen de escorrentía superficial, lo que puede causar erosión significativa en las pendientes más pronunciadas. Para mitigar estos efectos, la Unidad Minera Cerro Lindo ha implementado sistemas de control de erosión y manejo de aguas pluviales, que incluyen la construcción de terrazas y canales de desviación.

Sismicidad

La región donde se encuentra Cerro Lindo es sismotectónicamente activa, debido a su ubicación en la convergencia de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Esta interacción tectónica genera una alta frecuencia de eventos sísmicos de baja a moderada magnitud, los cuales han moldeado en parte la fisiografía actual de la zona. La empresa ha tomado en cuenta este factor en el diseño de sus estructuras mineras, implementando medidas de seguridad que cumplen con los estándares internacionales para la construcción en zonas sísmicamente activas.

2.1.5. Recursos

La Unidad Minera Cerro Lindo se encuentra en una región rica en recursos minerales, lo que la ha convertido en una operación estratégica para la Compañía Minera Milpo S.A.A. Los recursos disponibles en Cerro Lindo no solo abarcan los minerales explotables, sino también una infraestructura avanzada y un capital humano altamente capacitado, que en conjunto contribuyen al éxito y la sostenibilidad de la operación minera.

Recursos Minerales

Cerro Lindo es conocida principalmente por su producción de minerales polimetálicos, con un enfoque en zinc, cobre, plomo y plata. Los cuerpos mineralizados en la zona se encuentran asociados a formaciones skarn y están alojados en rocas carbonatadas del Jurásico. Estos recursos minerales han sido objeto de exploración y explotación desde el inicio de operaciones en 2007, y continúan siendo una fuente significativa de riqueza para la región.

Tabla N° 5: Principales Recursos Minerales de Cerro Lindo		
Mineral	Ley Promedio (%)	Producción Anual (toneladas)
Zinc	6.50%	1,500,000
Cobre	2.10%	750,000
Plomo	1.80%	400,000
Plata (g/t)	65	30,000

2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.2.1. Investigaciones internacionales.

Lobiano (2016), en su investigación titulada "Inclusión de interferencias operacionales de origen geotécnico en la planificación minera de panel caving", llevada a cabo para obtener el título de Ingeniero Civil de Minas en la Universidad de Chile, Santiago de Chile, se propuso como objetivo principal la creación de una metodología que permita integrar de manera dinámica interferencias de origen geotécnico en la Planificación Minera de Panel Caving. La metodología desarrollada se estructura principalmente en torno a dos modelos. En primer lugar, se encuentra un modelo destinado a estimar el peligro sísmico basándose en características geotécnicas y operacionales, el cual fue delineado en el informe sobre el Peligro Sísmico para el Plan Exploratorio. En segundo lugar, se presenta un modelo de optimización que alimenta el software de planificación minera Universal Delphos Sequencer and Scheduler. Este enfoque metodológico logra incorporar de manera dinámica el peligro sísmico para una zona de análisis, considerando sus parámetros geotécnicos y operacionales. La flexibilidad de esta metodología permite la posibilidad de incorporar otras interferencias operacionales definidas por modelos cuyas variables puedan ser controladas en el modelo de optimización, como se propone en este trabajo de tesis. Este estudio aporta a la presente tesis una base metodológica para la incorporación de interferencias operacionales en la planificación minera, que puede ser adaptada para optimizar estrategias de preparación minera en la Unidad Minera Cerro Lindo.

Medina y Vásquez (2018), en su proyecto integrador titulado "Evaluación de la operación de transporte minero usando simulación por eventos discretos en la cantera calizas HUAYCO S.A. ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas – Ecuador", llevado a cabo como requisito previo para obtener el título de Ingeniero de Minas en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, se propusieron desarrollar un modelo de simulación por eventos discretos con el fin de evaluar de manera confiable el sistema de carga y transporte en la cantera calizas HUAYCO S.A. El objetivo principal de este proyecto fue evaluar el sistema de carga y transporte en relación con el ciclo de producción, utilizando los recursos existentes y operativos de la empresa sin necesidad de adquirir nueva maquinaria o establecer nuevas rutas de transporte. Para lograr esto, se generaron distribuciones probabilísticas de las actividades mineras a partir de datos

temporales recolectados en el campo, y el modelo resultante se implementó utilizando el software Arena Input Analyzer. El análisis comprendió la evaluación de las vías internas de la mina para simular el movimiento de los volquetes mineros en el ciclo de acarreo, considerando variaciones en cada ciclo. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis matemático para comparar los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación. Los resultados de la simulación indicaron que, de los 140 escenarios evaluados, 24 fueron considerados óptimos. En contraste, el análisis matemático sugirió que para cada frente de explotación se requerían 4 volquetes en el parque automotor. Estos hallazgos ofrecen una perspectiva valiosa para mejorar la eficiencia y la planificación en la operación de transporte minero en la cantera calizas HUAYCO S.A. Este estudio ofrece un ejemplo práctico de cómo la simulación de procesos puede optimizar operaciones mineras, aplicable al contexto de la Unidad Minera Cerro Lindo.

Camhi (2012) exploró en su investigación titulada "Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving: caso estudio mina El Teniente Codelco Chile", realizada para obtener el grado de Magíster en Minería en la Universidad de Chile, Santiago de Chile. El propósito principal de esta tesis consistió en la reducción de costos y la mejora de rendimientos en las actividades de Preparación Minera, mediante el establecimiento de una metodología centrada en la optimización de los procesos de Desarrollo y Construcción de infraestructura. El objetivo era avanzar en la disposición de mineral para su producción de manera eficiente. Desde una perspectiva técnica, se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada en la excavación de galerías subterráneas mediante la metodología de Desarrollo Rápido (Rapid Development), así como en la industrialización y prefabricación de elementos estructurales de hormigón. Esto incluyó su aplicación en proyectos de infraestructura y tunelería civil. Asimismo, desde el punto de vista de la gestión, se examinó detalladamente la funcionalidad de la preparación minera mediante un estudio exhaustivo de la Dirección de Proyecto Preparación de Minas, la entidad encargada de ejecutar proyectos dentro de la División El Teniente. Los resultados obtenidos permitieron concluir que, si bien la aplicación parcial de la metodología de desarrollo rápido es viable en el método de hundimiento por Block Caving de la mina El Teniente, su implementación completa se ve limitada debido a las solicitaciones dinámicas asociadas a posibles estallidos de roca. Estos impiden la eliminación de la malla como solución de fortificación, así como las interferencias

generadas por los diferentes tipos de turnos y aislamientos por voladura ejecutados en horarios definidos para las faenas de extracción de mineral. Dichos horarios no son compatibles con los turnos de obras o preparación minera. Este estudio proporciona un enfoque metodológico para mejorar la gestión de equipos de carguío y transporte, aplicable en la optimización de estrategias en Cerro Lindo.

Palma y Forradellas (2009), en su artículo "Propuesta para la optimización de sistemas productivos modelados con simulación por eventos discretos", presentado en el XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación en la Universidad Nacional de Cuyo, Argentina, abordaron el desarrollo de una instancia de optimización destinada a brindar apoyo a los gerentes de operaciones en la configuración de una nueva red para sus sistemas productivos, ya sea mediante la adición o eliminación de eslabones dentro de la planta industrial. El enfoque del trabajo consistió en complementar las herramientas existentes de optimización para sistemas modelados y simulados mediante eventos discretos. La propuesta surgió al identificar, durante la revisión del estado del arte, la necesidad de incorporar en las herramientas de optimización la capacidad de modificar la red de producción. Esta instancia de optimización ofrece al gerente de operaciones la flexibilidad necesaria para ajustar y mejorar la eficiencia de su sistema productivo. Al permitir la modificación de la red de producción, la herramienta se convierte en un recurso valioso para la toma de decisiones estratégicas, facilitando la adaptación del sistema a cambios en la demanda o en las condiciones del mercado. La propuesta presentada por Palma y Forradellas contribuye al avance en la gestión y optimización de sistemas productivos al integrar la simulación por eventos discretos con herramientas de optimización. Este enfoque proporciona una valiosa perspectiva para mejorar la toma de decisiones estratégicas en entornos productivos mediante la flexibilidad y adaptabilidad de la red de producción. Este estudio ofrece una comprensión de las incertezas que pueden afectar la planificación y ejecución de proyectos mineros, relevante para la simulación de procesos en Cerro Lindo.

Gacitúa (2012), en su tesis denominada "Análisis cualitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles", desarrollada para obtener el título de Ingeniero Civil en la Universidad de Chile, Santiago de Chile, se enfocó en el examen de las incertezas presentes en la construcción de túneles, las cuales impactan directamente en la estimación de plazos y costos del proyecto. En una primera instancia, se procedió a identificar y

describir las variables que influyen en un proyecto de túneles, dividiéndolo en tres etapas fundamentales: exploración geotécnica, diseño y construcción. Se consideraron tres métodos distintos de excavación, a saber: tradicional en roca (mediante perforación y voladura), tradicional en suelo (método NATM) y mecanizado (mediante tuneladoras o TBM). La información recopilada provino tanto de fuentes bibliográficas existentes como de datos obtenidos a través de entrevistas a expertos del área. Los resultados de este análisis revelan que la mayor cantidad de incertezas en un proyecto de túneles se origina en la etapa exploratoria (59%) y en la fase de construcción (22%). Dentro de la etapa exploratoria, las condiciones hidrogeológicas y geológicas emergen como las más significativas, representando el 25% y el 24%, respectivamente. En la etapa de construcción, las principales fuentes de incertidumbre incluyen problemas medioambientales (6%), calidad de la construcción (8%) y gestión de la obra (8%). Este antecedente ofrece una comprensión de las incertezas que pueden afectar la planificación y ejecución de proyectos mineros, relevante para la simulación de procesos en Cerro Lindo.

2.2.2. Investigaciones nacionales.

Vargas (2019), en su tesis titulada "Mejoramiento del sistema de carguío y transporte en la UM San Rafael", presentada como requisito para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, se propuso optimizar el sistema de carguío y transporte de mineral con el objetivo de mejorar el dimensionamiento de la flota de equipos. El enfoque de la investigación se centró en un estudio de tiempos para identificar demoras operativas y no operativas en el sistema de carguío y transporte. El propósito era evaluar el rendimiento de los equipos y, basándose en estos resultados, calcular el número óptimo de unidades para la flota, con la intención de generar beneficios significativos y minimizar costos para la empresa. Los resultados obtenidos revelaron que dos volquetes estaban ubicados en la cola del área de evacuación del mineral y desmonte, generando tiempos muertos extensos. En relación con el equipo de transporte, se determinó que solo se requerían seis volquetes para cumplir con el plan de producción. Como conclusión, se logró optimizar el dimensionamiento de la flota mediante la incorporación de un cargador frontal L566 y la reducción de dos volquetes, resultando en un total de nueve equipos, tres para carguío y seis para transporte. Este ajuste permitió mejorar la eficiencia del sistema, generando beneficios tanto operativos

como económicos para la empresa minera UM San Rafael. Este antecedente ilustra cómo el análisis y la optimización del sistema de transporte pueden mejorar la eficiencia operativa, relevante para la simulación de procesos en Cerro Lindo.

Martínez (2019), en su tesis titulada "Mejoramiento de producción del carguío y transporte mediante la teoría de colas en compañía minera Los Andes Perú Gold S.A.C.", presentada como requisito para obtener el título de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional del Centro del Perú, se propuso mejorar la producción del carguío y transporte utilizando la teoría de colas. La operación de carguío involucra cuatro excavadoras 336DL_CAT distribuidas en diversos frentes de minado, y la operación cuenta con 40 volquetes de 20m³, de los cuales 30 están asignados al carguío y acarreo, y 10 al área de Proyectos. Los resultados obtenidos revelaron un error en la distribución del número de volquetes en cada frente, lo cual generaba pérdidas de producción y costos elevados. Al aplicar la teoría de colas, se logró mejorar la producción del carguío y acarreo del material. La conclusión principal de la tesis fue que, para evitar colas en los frentes, era necesario reducir el número de equipos de carguío y transporte en cada frente, lo que afectaba directamente el rendimiento de las excavadoras. Este enfoque basado en la teoría de colas no solo permitió corregir la distribución ineficiente de recursos, sino que también contribuyó a optimizar la producción en la compañía minera Los Andes Perú Gold S.A.C. mediante una mejor gestión de los equipos de carguío y transporte en los diversos frentes de minado.

Villar (2020), en su investigación denominada "Aplicación de sistemas expertos en el ciclo de carguío y acarreo y su impacto en el proceso de mejora continua y control de costos operativos", presentada como parte de los requisitos para obtener el título de Bachiller en Ingeniería de Minas en la Universidad Privada del Norte, se propuso argumentar la influencia directa de un sistema experto en el ciclo de carguío y acarreo, centrándose especialmente en la gestión de costos y la mejora continua. Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción en los tiempos de carguío y un incremento en los factores de carga en los casos de Aspee y Gárate. Este éxito se tradujo en una razón de toneladas por minuto que alcanzó los 160 [ton/min], en comparación con los 154 [ton/min] anteriores. En conclusión, se demostró que la implementación del sistema experto generó resultados positivos en términos de eficiencia y rendimiento económico. Este resumen destaca el aporte del sistema experto en la optimización del ciclo de carguío

y acarreo, evidenciando mejoras concretas en los tiempos de operación y la productividad. Estos hallazgos respaldan la importancia de integrar sistemas expertos en la gestión minera, no solo para mejorar el rendimiento operativo, sino también para influir positivamente en el control de costos y fomentar la mejora continua en los procesos mineros.

Araujo (2018), en su tesis titulada "Optimización de la flota de volquetes en el acarreo, para incrementar la producción en la mina los andes Perú Gold - Huamachuco", presentada como parte de los requisitos para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional de Trujillo, se propuso optimizar la flota de volquetes en la actividad de acarreo con el objetivo de incrementar la producción. Para alcanzar este propósito, se evaluó la cantidad necesaria de volquetes, se llevó a cabo un análisis de costos y beneficios de los equipos a utilizar, y se determinó la cantidad óptima a través de un análisis detallado del número de volquetes. Los resultados obtenidos indicaron que para abordar de manera eficiente el problema, se asignó una flota de volquetes, representando una fusión entre etapas con el objetivo de que cada etapa, al optimizarse individualmente, fuera viable para el problema global. Como conclusión, se resaltó que la implementación de la programación dinámica logró la optimización de la flota de volquetes para cada excavadora de la empresa, resultando en una reducción de los costos operativos. La aplicación de la programación dinámica como estrategia de optimización demostró ser exitosa en la asignación eficiente de volquetes a cada excavadora, contribuyendo así a la disminución de los costos operativos y, por ende, al mejoramiento de la producción en la mina Los Andes Perú Gold – Huamachuco. Este enfoque analítico y estratégico subraya la importancia de la planificación eficiente en la gestión minera.

Julca (2019), en su investigación titulada "Optimización del ciclo de carguío y acarreo del tajo al PAD de lixiviación para evitar tiempos muertos y reducir costos en una empresa minera de la mediana minería", presentada como parte de los requisitos para obtener el título profesional de Ingeniera de Minas en la Universidad Privada del Norte, se propuso optimizar el ciclo de carguío y acarreo desde el tajo hasta el PAD de lixiviación con el objetivo de evitar períodos de inactividad y reducir los costos. Para llevar a cabo esta optimización, se dividió el acceso minero en siete tramos, permitiendo así una evaluación más detallada de los tiempos en cada segmento. Estos tramos abarcaban desde el punto de carguío hasta la cima del acceso minero, pasando por la vía nacional, el Haul Road, y

finalmente, hasta el punto de descarga de mineral en el Pad de Lixiviación. Los resultados obtenidos indicaron mejoras significativas, como el aumento de la velocidad del volquete al regresar (vacío) de 43.11 km/h a 45.22 km/h. La optimización del ciclo de carga redujo el tiempo de 28.36 minutos a 25.53 minutos. Esta mejora se aplicó específicamente a los turnos diurnos, donde no se presentaban problemas de retrasos prolongados en comparación con los turnos nocturnos. En relación con el tiempo con y sin retardo en el proceso de lixiviación, se observó una reducción de 56.72 a 52.07 minutos en el turno diurno y de 58.52 a 57.52 minutos en el turno nocturno. Estos resultados destacaron la efectividad de la optimización en la reducción de tiempos y costos, contribuyendo así a una mayor eficiencia en el ciclo de carguío y acarreo en la empresa minera de mediana envergadura. Este estudio proporciona una valiosa perspectiva para mejorar la toma de decisiones estratégicas en entornos productivos mediante la flexibilidad y adaptabilidad de la red de producción.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Minería

La minería es la actividad que involucra la extracción selectiva de minerales y otros materiales de la corteza terrestre, un proceso vital para la obtención de recursos esenciales para la industria y la sociedad.

2.3.2. Operaciones del proceso minero subterráneo

Las operaciones del proceso minero subterráneo son esenciales para la extracción eficiente y segura de los recursos minerales situados bajo la superficie. Este proceso comprende varias etapas críticas: perforación, voladura, carguío y transporte. Cada una de estas etapas debe ser diseñada y ejecutada cuidadosamente para maximizar la recuperación del mineral, minimizar los costos operativos y reducir los riesgos asociados.

Perforación

La perforación en minería subterránea consiste en la creación de agujeros en la roca para la posterior inserción de explosivos. Es una etapa fundamental que define la eficiencia de las operaciones subsiguientes.

Según Jimeno et al. (1995), la perforación efectiva depende de factores como la resistencia de la roca, la longitud y el diámetro del barreno, y el tipo de perforadora utilizada. Los jumbos de perforación son máquinas ampliamente utilizadas debido a su capacidad de perforar múltiples agujeros simultáneamente y su adaptabilidad a diferentes condiciones subterráneas.

Los jumbos de perforación modernos están equipados con sistemas de control automatizados que mejoran la precisión y velocidad de perforación. Estos sistemas permiten la optimización de la malla de perforación, lo que a su vez mejora la fragmentación de la roca y reduce el consumo de explosivos (Atlas Copco, 2013).

Voladura

La voladura es el proceso de detonación controlada de explosivos dentro de los agujeros perforados para fragmentar la roca. El objetivo es obtener una granulometría específica que facilite el carguío y transporte del material.

La teoría de la voladura se basa en la liberación de energía química de los explosivos, que se convierte en energía mecánica y térmica, fragmentando la roca. Según Persson et al. (1994), factores como la disposición de los agujeros, la carga explosiva y el retardo de detonación son cruciales para una voladura eficiente y segura.

Estrategias y Técnicas

Las técnicas de voladura avanzada, como la voladura secuencial y la voladura controlada, permiten minimizar los efectos adversos como vibraciones y sobre-roturas, mejorando así la estabilidad de las excavaciones subterráneas (Langefors y Kihlström, 1963).

Carguío

El carguío consiste en recoger el material fragmentado y transferirlo a los equipos de transporte. En minería subterránea, se utilizan principalmente cargadores de bajo perfil (LHD).

El diseño eficiente del carguío se basa en la teoría del flujo de material y la capacidad de los equipos. Según Howard L. Hartman (1992), la selección del equipo de carguío depende de la dimensión de las galerías, la distancia de transporte y la capacidad de carga.

Los LHD modernos están equipados con motores diésel o eléctricos y sistemas de telemetría que permiten un seguimiento y control precisos de las operaciones. Esto reduce el tiempo de inactividad y mejora la productividad (Sandvik, 2016).

Transporte

El transporte en minería subterránea implica el movimiento del material fragmentado desde el punto de carga hasta la superficie o una planta de procesamiento subterránea.

La teoría del transporte se basa en la optimización de rutas y la capacidad de los equipos. Peters (1978) sugiere que el transporte eficiente minimiza el tiempo de ciclo y reduce los costos operativos.

Se utilizan diversos sistemas de transporte como volquetes de bajo perfil, cintas transportadoras y sistemas ferroviarios. La elección del sistema depende de la distancia de transporte, la inclinación del terreno y la capacidad de producción requerida (Joy, 2012).

Consideraciones de Seguridad

La seguridad en minería subterránea es crítica debido a los riesgos inherentes como derrumbes, gases tóxicos y condiciones de confinamiento. Según Brown (2003), la gestión de riesgos y la implementación de sistemas de monitoreo continuo son esenciales para garantizar la seguridad de los trabajadores.

Prácticas y Normativas

Las prácticas de seguridad incluyen el uso de equipos de protección personal, la implementación de sistemas de ventilación adecuados y la preparación de planes de emergencia y evacuación. Las normativas internacionales como las de la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 1995) establecen estándares de seguridad que deben ser cumplidos.

La opción de excavación más comúnmente empleada en la industria minera es la perforación y voladura. Esta alternativa es preferida debido a la vasta experiencia acumulada en el campo, su flexibilidad para cumplir con los diseños preestablecidos y las inversiones significativamente menores necesarias en comparación con los sistemas de excavación mecanizados.

El método de perforación y voladura es ampliamente utilizado en la minería actual, y sigue un ciclo de minado que involucra diversas etapas:

- **Perforación:** Se realizan perforaciones en la roca mediante taladros, siguiendo una malla predefinida para albergar el explosivo que facilitará la excavación.
- **Voladura:** El explosivo se coloca en las proporciones indicadas por el diseño y se detona. Posteriormente, se generan gases tóxicos que deben ser evacuados, lo que implica un tiempo de ventilación y la implementación de instalaciones adecuadas.
- **Extracción de material:** Se lleva a cabo la remoción de la roca fragmentada como resultado de la voladura, utilizando equipos Load Haul Dump (LHD). Estos materiales se transportan a puntos de acopio temporal, puntos de vaciado (traspaso a otro nivel) o directamente se cargan en volquetes para su transporte a la superficie.
- **Desate de rocas:** Consiste en eliminar las rocas que quedan suspendidas en el macizo rocoso y que podrían representar un riesgo para personas y equipos.
- **Sostenimiento:** Este proceso busca asegurar la superficie expuesta tras la excavación para prevenir desprendimientos. La estrategia de sostenimiento puede variar según parámetros como la calidad del macizo rocoso, el tipo de galería, el tiempo de uso de la galería y la presencia de agua. El diseño de sostenimiento puede incluir la colocación de mallas, shotcrete o ambas técnicas. La disponibilidad de equipos también influye en la productividad del ciclo de minado, especialmente en el sostenimiento. Si se cuentan con equipos empernadores, el proceso tiende a ser más rápido, ya que un mismo equipo puede ejecutar la perforación de taladros para pernos, la inyección de resina o lechada de cemento, y la instalación de pernos y placas. En ausencia de este equipo, se recurre a un jumbo para la perforación y a un equipo de levante para la instalación manual de pernos, lo cual afecta significativamente los tiempos de ejecución del sostenimiento.

2.3.3. Planificación de la preparación minera

La planificación minera abarca un conjunto de actividades dirigidas a programar de manera eficiente el uso de los recursos disponibles, alineándose con los objetivos estratégicos establecidos por la compañía (Bustamante et al., 2012).

Por lo general, se clasifica la planificación minera en tres categorías según el horizonte temporal al que se refiere:

- Planificación de Largo Plazo: Este enfoque abarca toda la vida útil de la mina, también conocida como "Life of Mine" (LOM). Busca establecer estrategias a largo plazo que guíen las operaciones mineras a lo largo de toda la duración del proyecto.
- Planificación de Mediano Plazo: Actuando como un puente entre la planificación de largo plazo y la de corto plazo, esta categoría abarca un período variable de uno a tres meses. Se enfoca en proporcionar una conexión coherente entre las estrategias a largo plazo y las operaciones más detalladas a corto plazo.
- Planificación de Corto Plazo: Con un mayor nivel de detalle, la planificación de corto plazo se ocupa de actividades específicas que se llevarán a cabo en intervalos de tiempo que pueden variar desde un mes hasta pocas horas. Se centra en la ejecución precisa de las operaciones diarias para optimizar la producción y la eficiencia (Campeau y Gamache, 2020).

El plan de preparación minera se elabora mediante una secuencia de actividades programadas según las necesidades actuales y futuras del proyecto, como se describe en el marco de explotación proporcionado por Alegría (2010):

- Definir el Programa de Obras:
 - Para el inicio de la explotación en un sector, se establece un programa de obras necesario.
 - Para la continuidad de la explotación en sectores ya en producción, se determina otro programa de obras.
- Planificar la Logística de Preparación:

- Considerar las características del proyecto y la variante del método de explotación para planificar la logística de preparación del área.
- Definir la Programación de Adquisiciones:
 - Identificar y programar las adquisiciones necesarias para la operación minera.
- Estimar la Flota de Equipos:
 - Evaluar y estimar la flota de equipos requerida para llevar a cabo el programa de obras planificado.
- Estimar el Personal de Trabajo:
 - Determinar la cantidad de personal necesario para cumplir con el programa de obras.
- Definir Actividades Críticas:
 - Identificar las actividades críticas que establecerán las rutas prioritarias para la preparación de los distintos sectores.
- Inicio de Obras:
 - Iniciar las obras correspondientes al programa de desarrollos, ya sea mediante personal interno o a través de contratos con empresas externas.
- Recepción y Entrega:
 - Recepcionar las obras realizadas y entregar la zona preparada al área de producción.

La planificación del programa de preparación considera además una serie de criterios en su desarrollo, dentro de los más relevantes se encuentran:

- Estrategia de crecimiento del sector.
- Geología.
- Geomecánica.

- Diseño minero.
- Planificación minera.

Los criterios mencionados por Contreras (2016) ejercen una notable influencia en la zona de preparación, las secuencias constructivas de las obras y, por consiguiente, en el tiempo necesario para llevar a cabo la preparación. Además, el diseño definido determina la implementación de la logística del proyecto, la cual debería orientarse a facilitar los rendimientos de preparación.

En la actualidad, la planificación de la preparación minera carece de consideraciones sobre variabilidad en sus cálculos, basándose tradicionalmente en la experiencia de los planificadores mediante rendimientos empíricos de proyectos anteriores o en datos históricos del sector. El uso de planillas de cálculo y Cartas Gantt para la planificación de desarrollos y obras civiles, aunque común, resulta en planes poco flexibles.

Los desafíos en la planificación de esta área se deben, en gran medida, a las modificaciones constantes de las condiciones o a la falta de información al inicio o durante el desarrollo del proyecto de construcción. Suponer la inexistencia de aleatoriedad en el sistema es más bien una representación estática, y utilizar un plan subestimado o sobreestimado puede tener repercusiones en la apertura y la incorporación de áreas, afectando así el negocio a largo plazo (Contreras, 2016).

2.3.4. Simulación de la preparación minera

Las técnicas de simulación son ampliamente empleadas en la industria minera, centrándose especialmente en aspectos relacionados con la producción. Estas técnicas se aplican con frecuencia en la planificación de la producción, rendimientos de producción, disponibilidad de puntos de extracción y fragmentación (Li, 2012). Los proyectos de construcción de túneles se destacan como idóneos para la simulación debido a los ciclos repetitivos de construcción inherentes a su ejecución (Ruwanpura et al., 2001).

El uso de modelos de simulación en la industria minera se ha vuelto una práctica común, impulsada por los avances tecnológicos en informática. Estos estudios de simulación pueden realizarse mediante modelos continuos o discretos, siendo la mayoría de las operaciones mineras ejemplos de sistemas de eventos discretos (Bedón, 2005).

Un hito en el desarrollo de modelos de simulación en minería fue alcanzado por Karsten Rist en 1961, cuando desarrolló un modelo para optimizar el número de vagones necesario en un sistema de acarreo en una mina subterránea de molibdeno en los Estados Unidos (Meza, 2011).

2.3.4.1. Simulación, sistema y modelo

Según Medina y Vasquez (2018), la simulación se define como una técnica que posibilita la representación, imitación y recreación del funcionamiento de un sistema del mundo real a medida que transcurre el tiempo. El propósito principal de esta técnica es proponer diversas alternativas que contribuyan a mejorar el sistema. El sistema que se desea estudiar se conoce como el proceso o caso de estudio.

Para llevar a cabo la simulación de un sistema, es imperativo contar con un modelo previo del mismo. Un modelo se concibe como la representación de un sistema real diseñada para ser examinada y manipulada con el objetivo de tomar decisiones respecto a alternativas de desarrollo a implementar en dicho sistema (Medina y Vasquez, 2018).

Es esencial que el modelo posea un nivel de detalle considerable para permitir al modelador evaluar con un alto grado de confianza las conclusiones que se aplicarán al sistema real. Además, debe ser de fácil comprensión, manipulación y control por parte del modelador.

2.3.4.2. Componentes de la simulación

Para estudiar un modelo de simulación, es necesario identificar cada uno de los elementos que componen un sistema. Los elementos que lo componen son:

- Entidad
- Atributo
- Actividad
- Evento
- Variables
- Filas

2.3.4.2.1. Entidades

Un componente de interés en la simulación es aquel que representa un objeto en movimiento, experimentando cambios de estado e interactuando con otras entidades. Este componente es fundamental para comprender el comportamiento dentro del sistema real y proponer alternativas de mejora que contribuyan a la eficiencia del sistema (Medina y Vasques, 2018).

En algunos casos, la entidad representada puede ser ficticia, utilizada con el propósito de modelar "artificios" que son necesarios en la construcción del modelo. Este enfoque permite abordar aspectos específicos del sistema y evaluar posibles mejoras de manera más completa y precisa.

2.3.4.2.2. Atributos

En el contexto de la simulación, los atributos son características que pertenecen a una entidad y son asignados por el modelador. Estos atributos desempeñan un papel crucial al permitir la distinción entre diferentes entidades. Cada entidad posee atributos específicos, que son variables locales propias y únicas para esa entidad en particular (Medina y Vasques, 2018). Estos atributos son esenciales para la representación detallada y la manipulación precisa de cada entidad en el modelo.

2.3.4.2.3. Actividades

De acuerdo con Medina y Vasques (2018), un módulo de actividad en la simulación es donde una entidad participa en una actividad o proceso específico. Para que la entidad atraviese este proceso, se requiere que tome un tiempo previamente conocido para ejecutarlo. Este módulo se divide en dos categorías:

- Sin recurso: Todas las entidades pueden ingresar a la actividad o proceso, toman su tiempo de demora especificado y salen. Por ejemplo, caminar, donde todas las personas (entidades) caminan en una zona específica y les tomará un tiempo conocido.
- Con recursos: La entidad ingresa a la actividad, adquiere un recurso, realiza la actividad en un tiempo conocido y se retira. Si no hay más recursos disponibles, otras entidades no podrán ingresar a la actividad hasta que se libere uno, formando una fila o "cola".

La duración de una actividad puede ser constante, empírica o estocástica, y también se puede asignar una duración ficticia igual a cero. Este enfoque permite modelar diversos escenarios y condiciones dentro del sistema simulado.

2.3.4.2.4. *Eventos*

Según Medina y Vasques (2018), un evento en la simulación se define como el cambio de estado del sistema y sus propiedades, generado por el ingreso o salida de un atributo. Los eventos pueden clasificarse en exógenos y endógenos. En el contexto de este proyecto, un evento exógeno sería la llegada de los volquetes con carga a la trituradora primaria, mientras que un evento endógeno sería la descarga del material en dicha trituradora. Estos eventos son fundamentales para modelar las dinámicas del sistema y capturar los cambios relevantes en su estado.

2.3.4.2.5. *Variables del estado del sistema*

En el contexto de la simulación, las variables de estado son características globales que son necesarias para definir en detalle los eventos del sistema en un tiempo específico (Medina y Vasques, 2018). Algunos ejemplos de variables de estado incluyen:

- El estado de la trituradora donde se descarga el mineral proveniente del frente: Activo, inactivo, ocupado o desocupado.
- Número de volquetes en el sistema.

Estas variables de estado son fundamentales para capturar y representar la situación actual del sistema en un momento dado, permitiendo una evaluación completa y detallada de su funcionamiento.

2.3.4.2.6. *Filas*

La "cola", comúnmente conocida como fila, es el lugar en el sistema donde las entidades se detienen. Por lo general, las filas se generan al inicio de una actividad cuando los recursos están siendo utilizados por una entidad (Medina y Vasques, 2018).

El comportamiento de un atributo se refiere a la manera en que actúa frente a una fila. Las situaciones relacionadas con el comportamiento incluyen la posibilidad de saltar la fila, moverse entre filas o simplemente abandonarla, evitando así la actividad. Estos

comportamientos son cruciales para modelar las interacciones dinámicas y las decisiones de las entidades dentro del sistema simulado.

2.3.5. *Procesos en la simulación*

La simulación implica la imitación de un proceso o sistema de la vida real en el tiempo, generando y observando una historia artificial para extraer conclusiones sobre las características del sistema real que se está representando (Banks, 1999).

Para garantizar el éxito de un modelo de simulación, es crucial considerar algunos elementos clave, según Contreras (2016). A continuación, se enumeran algunas razones por las cuales un modelo de simulación podría no arrojar los resultados esperados:

- Cantidad de réplicas o corridas: Es necesario realizar más de una réplica del modelo para obtener estadísticas de intervalo que ofrezcan un resultado más preciso de la variable de análisis. Las diferentes réplicas generan distintos escenarios basados en números pseudoaleatorios iniciados en cada corrida.
- Tamaño de la corrida: En ocasiones, el tamaño de la corrida puede ser insuficiente. Es crucial que la simulación considere el tiempo necesario para que las variables se estabilicen en el sistema y alcancen un estado estable.
- Variable de respuesta mal definida: Aunque el modelo de simulación represente de manera efectiva la realidad, si la variable de respuesta seleccionada no es la apropiada, resultará difícil tomar decisiones impactantes en la operación del sistema bajo estudio.
- Error al establecer relaciones entre las variables: Un error común es no establecer adecuadamente las relaciones lógicas entre las variables aleatorias del modelo. Se puede evitar este problema llevando el modelo a su máxima capacidad de análisis, tanto analítico como visual, y observando su comportamiento mediante análisis de sensibilidad.
- Error al determinar el tipo de distribución asociado a las variables aleatorias: Es posible utilizar distribuciones que no sean las más adecuadas o que respondan únicamente a un intento de simplificar los estudios estadísticos, lo que podría

afectar significativamente los resultados de la simulación al alejarse del comportamiento real.

- **Uso incorrecto de la información:** A menudo, la información se recolecta, analiza y administra según las necesidades individuales, lo que implica que no siempre está en el formato y la presentación requeridos para la simulación. Utilizar información sin depurar y reorganizar puede afectar la precisión de los resultados y conducir al efecto GIGO (Garbage In, Garbage Out), donde la entrada de parámetros erróneos produce resultados igualmente incorrectos.
- **Falta o exceso de detalle en el modelo:** En ocasiones, un proceso se simplifica tanto que se convierte en una "caja negra", dificultando la comprensión de lo que ocurre en su interior. Por otro lado, un modelo demasiado detallado puede aumentar significativamente el tiempo y el costo de la simulación.

2.3.6. *Software de simulación*

Arena de Rockwell Software ha sido seleccionado como el software para llevar a cabo la simulación en el proyecto de optimización de carga y transporte en una mina a cielo abierto. Aguirre (2017) describe a Arena como una herramienta poderosa para la simulación de procesos, cuyo origen se remonta a 1982 cuando Dennis Pegden introdujo un lenguaje de simulación para modelar sistemas de manufactura. En 1993, este lenguaje evolucionó y fue lanzado como Arena, permitiendo la creación de modelos a través de interfaces gráficas e interactivas para simular áreas específicas de los procesos de producción o construcción.

En su esencia, Arena es un software diseñado para analizar el impacto de cambios significativos y complejos en procesos empresariales, abarcando aspectos como la cadena de suministro, fabricación, logística, distribución, almacenamiento y sistemas de servicio. Agrega flexibilidad y amplitud de cobertura, permitiendo modelar cualquier nivel de detalle y complejidad deseado.

Entre las capacidades de Arena destacan:

- a) Modelar procesos, documentarlos y comunicarlos de manera colaborativa.

b) Simular escenarios futuros de sistemas para comprender relaciones complejas e identificar oportunidades de mejora.

c) Visualizar operaciones mediante gráficos de animación dinámicos.

d) Analizar sistemas utilizando el método "Qué pasaría si (What if)" para evaluar alternativas de soluciones y seleccionar la mejor ruta para implementar cambios en la empresa.

En resumen, Arena se presenta como una herramienta orientada al proceso, brindando la capacidad de modelar, simular, visualizar y analizar sistemas complejos, lo cual será fundamental en el desarrollo y optimización del proyecto minero.

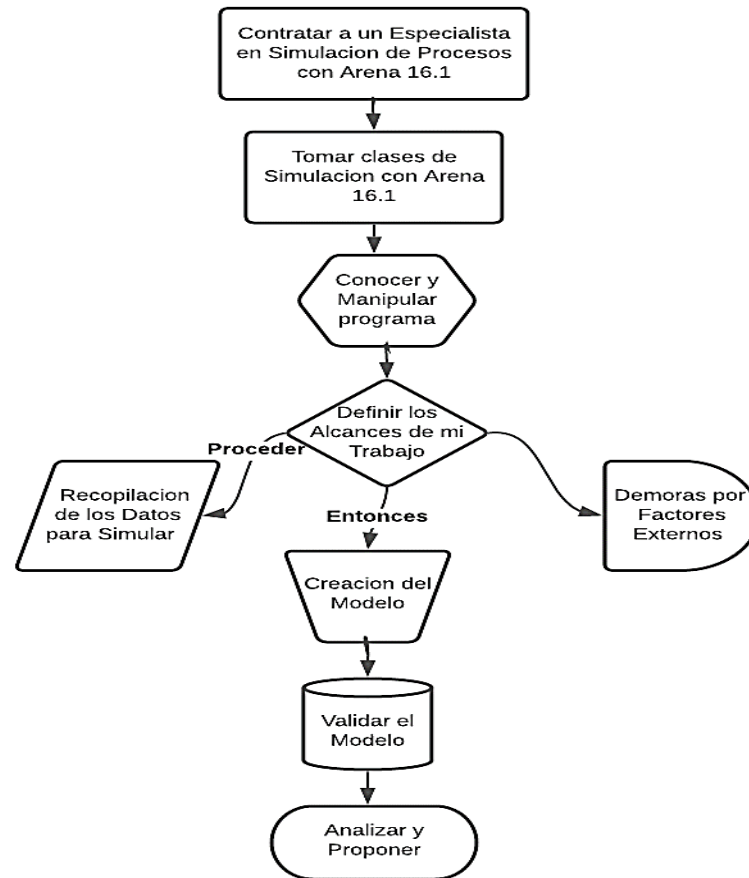
Arena se presenta como un ambiente completo de desarrollo de simulaciones con una amplia gama de capacidades. Según Kelton (2004), este software ofrece la posibilidad de generar modelos, producir datos aleatorios como entradas, ejecutar modelos bajo condiciones parametrizables, crear animaciones, generar informes estándar y personalizados, comparar diferentes modelos, buscar optimizaciones y realizar integraciones con aplicaciones ampliamente utilizadas como Microsoft Office, bases de datos y lenguajes de programación.

Kelton, Sadowski y Sturrock (2008) explican que los módulos en Arena pueden presentarse en dos formas básicas: diagrama de flujo y datos. Los módulos de diagrama de flujo describen los procesos dinámicos del modelo, mientras que los módulos de datos definen las características de diversos elementos del proceso, como entidades, recursos y colas.

2.3.7. Aplicación del software de simulación

Para realizar la aplicación del software Arena se seguirá las siguientes etapas mostradas a continuación.

Figura N°2: Etapas de aplicación del software de simulación



Contratación de un Especialista en Simulación de Procesos con Arena 16.1: Después de realizar un análisis exhaustivo y buscar información, se llevó a cabo la contratación de un especialista en simulación de procesos con experiencia en el software Arena 16.1. Este proceso implicó coordinación durante un período de 5 días para asegurar los servicios de enseñanza necesarios.

Clases de Simulación con Arena 16.1: Para desarrollar el modelo de simulación del proyecto, se llevó a cabo un proceso de aprendizaje que abarcó un total de 76 horas, iniciando el 14 de octubre de 2020 y concluyendo el 14 de diciembre del mismo año. Durante este período, se adquirieron habilidades en el manejo de las herramientas fundamentales del software, incluyendo Basic Process y Advanced Process.

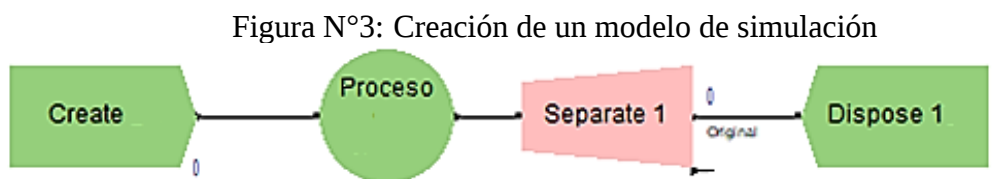
Conocer y Manipular el Programa: Durante el proceso de aprendizaje, se estudiaron diversos módulos que componen Basic Process y Advanced Process, como create, process, decision, delay, hold, assign, record, dispose, entre otros. Estos módulos se

utilizarán para codificar el modelo, asignando tiempos de llegada, tiempos de procesamiento, condiciones, esperas, y salidas de entidades, entre otros.

Definir los Alcances del Trabajo: Después de familiarizarse con el procesamiento de información en el software, se definió el alcance de la investigación. Este se centrará en determinar el tiempo total de un ciclo de trabajo en la mina Cerro Lindo, considerando los tiempos efectivos de cada etapa del ciclo.

Recopilación de Datos para Simular: Se seleccionaron y recopilaron los datos necesarios en la mina Cerro Lindo. Estos datos, que incluyen tiempos de operaciones mineras horizontales como ventilación, retiro de desmonte, desate, perforación y fortificación, lechado de pernos, colocación de malla, shotcrete, perforación del frente de labor, y carga de explosivos, serán utilizados para crear y validar el modelo de simulación.

Creación del Modelo: Luego de tener todos los datos que se utilizaran en la simulación, se procedió a crear el modelo el cual será un modelo discreto con las características siguientes:



2.3.8. Interferencias en la preparación minera

Interferencia se define como cualquier situación que provoca pérdida de tiempo y afecta el desarrollo normal de una actividad (Alegría, 2010). Estas interferencias pueden ser tanto programadas como no programadas, y su impacto se refleja en la reducción del tiempo de trabajo efectivo. En el contexto de la operación minera, las interferencias pueden surgir tanto en el ámbito de la producción como en el de la preparación, y en este caso, el análisis se centra en la preparación minera.

Aunque las interferencias son comunes en todas las operaciones mineras, la cantidad y el tipo de interferencias pueden variar significativamente entre diferentes faenas, ya que dependen de las condiciones de operación y de la estrategia empleada durante la operación o preparación. Por lo general, son las empresas contratistas las responsables de llevar a cabo la preparación minera, lo que introduce variables versátiles que pueden

derivarse de la gestión y planificación de la empresa contratista, situaciones endógenas de la empresa contratista, externalidades atribuibles a condiciones de la empresa minera o a causas externas en las que el sector minero no tiene responsabilidad directa.

Diversos autores han identificado y descrito los posibles problemas que pueden surgir durante la preparación minera, generando demoras no planificadas y, consecuentemente, incumplimientos en los plazos establecidos previamente para el proyecto.

Salgado (2009) identifica las principales actividades que afectan al ciclo de minado en la empresa minera Cerro Lindo, las cuales son:

- Aislaciones post voladuras.
- Retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas)
- Simulacros de incendios.
- Simulacros de estallidos de rocas.
- Interferencia con otras operaciones.
- Interferencia por cierre total de accesos.

Las problemáticas mencionadas pueden tener impacto tanto en la operación como en la preparación minera, y en términos generales, su origen está relacionado con órdenes o responsabilidades de la empresa.

Un análisis más detallado de algunos sectores productivos de la División El Teniente fue llevado a cabo por Alegría (2010)

Las interferencias operacionales más significativas identificadas en el estudio se presentan en la Tabla 1, mientras que los problemas logísticos más relevantes se detallan en la Tabla 6.

Tabla N° 6: Interferencias operacionales en la unidad minera de Cerro Lindo

Interferencias Operacionales
1. Disponibilidad de equipos
2. Corte de energía y agua
3. Clima (meteorología)
4. Movilizaciones
5. Disponibilidad de pique para vaciado de marina
6. Disponibilidad de la planta de hormigón
7. Aislaciones post-tronadura
8. Aislaciones por alerta sísmica
9. Simulacros de incendio
10. Interferencia con otros contratistas
11. Otros

Fuente: Alegría, 2010

En la categoría "Otros", se pueden mencionar problemas adicionales que resultan de una gestión deficiente por parte de la empresa contratista. Estos incluyen la falta de herramientas, la ausencia de personal y, en general, cualquier situación que surja debido a una mala administración de la empresa contratista. Además, en esta categoría se pueden abordar problemas relacionados con fallas en equipos específicos, como ventiladores, canchadores, ferrocarriles, entre otros, que son responsabilidad directa de la empresa.

Tabla N° 7: Problemas de Logística identificados en la unidad minera de Cerro Lindo

Lejanías de las frentes de trabajo	La lejanía de las frentes de trabajo afecta directamente en los tiempos de traslado del personal, el abastecimiento de materiales e insumos y a la extracción de marina.
Dispersión física de las obras	Cuando las actividades de preparación se encuentran concentradas físicamente, se obtienen mayores rendimientos al optimizar la utilización de los recursos.
Interacción con actividades de producción	Mientras mayor sea la cercanía entre las actividades de preparación y producción, mayores serán las interferencias mutuas.
Disponibilidad de facilidades constructivas	Disponer de accesos independientes, vaciaderos de marina exclusivos, energía eléctrica, ventilación y abastecimiento de materiales cercanos a las frentes de trabajo, mejora los rendimientos de las actividades de preparación.

Fuente: Alegría, 2010

2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Minería: La minería es la actividad que involucra la extracción selectiva de minerales y otros materiales de la corteza terrestre, un proceso vital para la obtención de recursos esenciales para la industria y la sociedad.

Optimización: En el contexto minero, se refiere al continuo esfuerzo por mejorar la eficiencia y el rendimiento de las operaciones mediante la implementación de estrategias y tecnologías que maximizan la producción y reducen los costos.

Ciclo de Carguío y Acarreo: Secuencia estratégica en minería que abarca desde la carga del material extraído por las máquinas hasta su transporte a través de volquetes, buscando una coordinación eficiente para mantener la productividad.

Excavación: Proceso de cavar o perforar la tierra para acceder a los depósitos minerales utilizando maquinaria especializada para la extracción de rocas y minerales.

Transporte: En minería, implica el desplazamiento planificado y eficiente del material extraído desde la zona de extracción hasta su destino, contribuyendo a la fluidez y continuidad de las operaciones.

Simulación: Representación digital de procesos mineros para analizar su comportamiento, prever escenarios y tomar decisiones informadas utilizando modelos matemáticos y computacionales.

Interferencias: Situaciones en minería que generan pérdida de tiempo y afectan el desarrollo normal de las actividades, pudiendo ser programadas o no programadas y proviniendo de diversas fuentes.

Planificación Minera: Proceso estratégico que involucra la programación eficiente de recursos para alinearse con los objetivos estratégicos, abarcando desde el largo plazo hasta la ejecución detallada de operaciones a corto plazo.

Producción: Volumen de material extraído y procesado en un periodo determinado, siendo un indicador clave para evaluar el rendimiento y la eficiencia de las operaciones.

Preparación Minera: Fase inicial que implica la programación y ejecución de obras necesarias para iniciar o dar continuidad a la explotación de un sector minero, abarcando desde logística hasta adquisiciones y personal.

Voladura: Proceso controlado de detonar explosivos para fragmentar material rocoso, facilitando la extracción y el transporte eficiente del material.

Equipos Mineros: Maquinarias especializadas diseñadas para realizar diversas tareas en operaciones mineras, contribuyendo a la eficiencia y seguridad de las actividades.

Costos Operativos: Gastos asociados a la ejecución de actividades en minería, cubriendo desde salarios hasta mantenimiento de equipos, fundamentales para la gestión financiera.

Proyectos Mineros: Iniciativas planificadas para la extracción de minerales, involucrando desde la exploración hasta la explotación y procesamiento.

Tiempo Muerto: Periodos inactivos o no productivos durante la operación minera, representando una pérdida de eficiencia y recursos.

CAPITULO III

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADORA DE SIMULACIÓN DE PROCESOS PARA ABORDAR INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN EL CARGUÍO Y ACARREO

3.1. INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO

Las interferencias operacionales se refieren a cualquier obstáculo, evento o situación imprevista que interrumpe o afecta negativamente el flujo normal de las operaciones dentro de una mina. En el contexto del sistema de carguío y acarreo, estas interferencias pueden manifestarse como retrasos, fallos en el equipo, problemas logísticos o errores humanos, entre otros. La identificación y gestión de estas interferencias es crucial para mantener la eficiencia y la productividad en niveles óptimos, ya que cualquier interrupción puede tener un efecto dominó, afectando no solo la operación inmediata, sino también el rendimiento global de la mina.

3.1.1. Importancia de Identificar y Mitigar Interferencias

La identificación y mitigación de interferencias operacionales es esencial para evitar pérdidas significativas en la producción. En un sistema de carguío y acarreo, donde cada segundo cuenta para mantener la operación dentro de los parámetros establecidos, una interferencia no gestionada puede llevar a tiempos muertos, desperdicio de recursos y un aumento en los costos operativos. Además, la capacidad de identificar de manera proactiva posibles interferencias permite a los equipos de operación implementar medidas correctivas antes de que los problemas se agraven, asegurando así un flujo de trabajo continuo y eficiente.

3.1.2. Descripción del Sistema de Carguío y Acarreo

Componentes del Sistema

El sistema de carguío y acarreo en una operación minera subterránea como Cerro Lindo está compuesto por varios equipos especializados que trabajan en conjunto para extraer y transportar el mineral desde el frente de trabajo hasta la superficie o planta de procesamiento. Entre los principales componentes de este sistema se encuentran las palas mecánicas y los cargadores frontales, que son responsables de cargar el mineral volado

en los camiones o volquetes. Estos vehículos, diseñados para operar en túneles angostos y en condiciones de baja ventilación, transportan el material a través de rutas establecidas hasta los puntos de descarga. Cada uno de estos equipos es crucial para el funcionamiento del sistema, y su correcto mantenimiento y operación son vitales para evitar interrupciones.

Proceso Operacional del Carguío y Acarreo

El proceso operacional del sistema de carguío y acarreo comienza con la voladura del frente de trabajo, que desprende el mineral del macizo rocoso. Posteriormente, el mineral fragmentado es recogido por las palas o cargadores y depositado en los volquetes o camiones de bajo perfil. Estos vehículos transportan el mineral a través de las galerías subterráneas hasta la tolva de descarga o directamente a la planta de procesamiento, dependiendo de la infraestructura de la mina. Durante este proceso, la sincronización y coordinación entre las operaciones de carguío y acarreo son esenciales para evitar congestiones y garantizar que el flujo de mineral sea constante.

3.1.3. Tipos de Interferencias Operacionales en el Sistema de Carguío y Acarreo

Interferencias Mecánicas

Las interferencias mecánicas son una de las causas más comunes de interrupciones en el sistema de carguío y acarreo. Estas pueden incluir fallos o malfuncionamientos en los equipos, como problemas en los motores de los cargadores o camiones, roturas en los sistemas hidráulicos o fallos en los sistemas eléctricos. Estos problemas pueden detener por completo las operaciones, especialmente si ocurren en puntos críticos del proceso. Además, las interferencias mecánicas no solo provocan tiempos muertos, sino que también pueden requerir costosas reparaciones o incluso el reemplazo de equipos, lo que aumenta significativamente los costos operativos.

Interferencias Humanas

Los errores operativos y las interferencias humanas son otra fuente importante de problemas en el sistema de carguío y acarreo. Estos pueden incluir desde errores en la operación de los equipos, como sobrecargar un camión o no seguir los protocolos de seguridad, hasta problemas de comunicación entre los operadores. La capacitación insuficiente o la falta de experiencia de los operadores puede aumentar la probabilidad de

errores humanos, lo que a su vez puede llevar a accidentes, daños en los equipos y retrasos en la producción. La gestión efectiva del talento humano, incluyendo la formación continua y la supervisión adecuada, es esencial para minimizar estas interferencias.

Interferencias Logísticas

Las interferencias logísticas surgen principalmente de la falta de coordinación en el flujo de trabajo y la congestión en las rutas de acarreo. Si no se gestionan adecuadamente, pueden provocar demoras significativas, ya que los camiones deben esperar para cargar o descargar el mineral. Además, la falta de sincronización entre el carguío y el acarreo puede llevar a un uso ineficiente de los equipos, aumentando los tiempos de ciclo y reduciendo la productividad. Una planificación logística adecuada y el uso de tecnologías de seguimiento en tiempo real pueden ayudar a mitigar estas interferencias.

3.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La implementación de la metodología de simulación en la Unidad Minera Cerro Lindo tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia operativa del sistema de carguío y acarreo, minimizando las interferencias y optimizando el rendimiento general de las operaciones. La simulación se convierte en una herramienta esencial para modelar y analizar los procesos clave, permitiendo identificar cuellos de botella, prever problemas y evaluar diferentes escenarios operacionales sin interrumpir las actividades reales de la mina para simular este procedimiento utilizaremos el Software Arena, siguiendo los siguientes procesos:

3.2.1. *Recolección de Datos en Campo*

Para llevar a cabo la recolección de datos en campo, se identificaron los procesos clave de la operación minera, incluyendo perforación, voladura, ventilación, carguío, acarreo, sostenimiento y aseguramiento de calidad. Cada uno de estos procesos fue analizado minuciosamente para registrar tiempos exactos de operación y cualquier interrupción que afecte la eficiencia.

Se seleccionará una muestra representativa de 100 ciclos completos de operación a lo largo de un mes. Este período de observación permitió cubrir diferentes turnos y condiciones operativas, garantizando así que los datos recolectados reflejen las variaciones diarias y semanales en las operaciones mineras. Para asegurar la precisión de

los datos, se utilizaron cronómetros digitales y un software de registro en tiempo real. Además, se diseñarán hojas de registro específicas para documentar cada evento, incluyendo la duración de las operaciones y las causas de cualquier interrupción como a continuación se muestra en la tabla 8.

Tabla N° 8: Modelo de tabla para la recolección de datos en campo

Ciclo	Fecha	Turno	Etapa del Ciclo	Hora de Inicio	Hora de Fin	Tiempo (min)	Causa de la Interrupción	Comentarios
-------	-------	-------	-----------------	----------------	-------------	--------------	--------------------------	-------------

***Nota:** La aplicación de esta tabla garantiza la recogida de datos adecuados al proporcionar un formato estructurado y detallado para registrar tiempos exactos de operación y las causas de cualquier interrupción en los procesos clave de la mina.

El procedimiento fue posible con la colocación de observadores capacitados en puntos estratégicos de la mina. Estos observadores fueron responsables de registrar los tiempos y movimientos de manera precisa, desglosando cada ciclo de operación en sus etapas específicas: inicio de operación, interrupciones y finalización. Además de registrar los tiempos, los observadores documentarán las causas de las interrupciones y cualquier variación en el proceso estándar. Este enfoque sistemático permitirá identificar patrones y fuentes comunes de ineficiencia.

3.3. Análisis de datos

Una vez recolectados, los datos se analizaron para identificar patrones y variaciones en los tiempos de operación. Por ejemplo, en la etapa de perforación se espera un tiempo promedio de 30 minutos con una desviación estándar de 5 minutos, mientras que la etapa de voladura tendrá un tiempo promedio de 20 minutos con una desviación estándar de 4 minutos. Este análisis ayudará a identificar las etapas del ciclo que son más propensas a

interrupciones y variaciones, permitiendo así desarrollar estrategias específicas para mitigarlas.

3.3.1. Implementación del Software Arena

La selección del software Arena v16.2 se basó en su capacidad para modelar sistemas de producción complejos y simular diferentes escenarios operativos. Esta versión del software ofrece funcionalidades avanzadas que permiten una mayor precisión en la simulación y análisis de datos. Para asegurar el uso efectivo del software, se tomaron los servicios de un especialista en modelamiento computacional, donde se abordó desde la creación de modelos básicos hasta la simulación de escenarios complejos.

El desarrollo de modelos de simulación se basó en los datos recolectados en campo. Se construirán modelos precisos que representen los procesos operativos de la mina, incluyendo todas las etapas del ciclo de carguío y acarreo, así como las posibles interrupciones y variaciones. Se realizaron pruebas iniciales de los modelos para identificar posibles errores y ajustar los parámetros según sea necesario. Estas pruebas ayudarán a asegurar que los modelos sean lo más precisos y realistas posibles.

Una vez desarrollados los modelos, se ejecutarán simulaciones que permitirán comparar los resultados obtenidos con los datos históricos. Esta comparación será crucial para validar la precisión de los modelos y realizar ajustes adicionales si es necesario. El cronograma de implementación incluye la selección y adquisición del software, la capacitación del personal, el desarrollo de modelos y las pruebas y ajustes necesarios.

Tabla N° 9: Cronograma de Implementación

Actividad	Duración	Recursos Necesarios	Responsable
Selección y adquisición de software	2 semanas	Presupuesto para compra de software	Gerente de TI
Capacitación del personal	1 mes	-----	Recursos Humanos
Desarrollo de modelos	2 meses	Datos de campo, software Arena	Equipo de Simulación
Pruebas y ajustes	1 mes	Modelos iniciales, datos históricos	Equipo de Simulación

La implementación del software Arena permitirá una modelación precisa y eficiente de los procesos mineros, optimizando el uso de recursos y reduciendo costos operativos. La capacitación adecuada del personal y la validación de los modelos asegurarán que la simulación se convierta en una herramienta poderosa para la toma de decisiones estratégicas en la operación minera.

3.3.2. *Análisis Estadístico*

La preparación de datos incluirá la limpieza de datos para corregir errores y eliminar valores atípicos, así como la codificación de variables cualitativas y cuantitativas para facilitar el análisis. Se seleccionarán técnicas estadísticas adecuadas para el análisis, incluyendo análisis descriptivo para calcular medidas de tendencia central y dispersión, y pruebas de hipótesis como la prueba t de Student, ANOVA y análisis de regresión.

El software SPSS se utilizará para realizar análisis estadísticos avanzados y generar informes detallados. Los resultados del análisis descriptivo proporcionarán una visión clara de la distribución de los datos y las variaciones en los tiempos de operación. Por ejemplo, el análisis descriptivo de los tiempos de perforación podría mostrar una media de 30 minutos, una mediana de 30 minutos, una moda de 30 minutos y una desviación estándar de 5 minutos.

El análisis inferencial incluirá la prueba t de Student para comparar los tiempos de operación antes y después de la implementación de estrategias de mitigación, ANOVA para comparar las variaciones en los tiempos de operación entre diferentes turnos, y análisis de regresión para identificar las variables que tienen un impacto significativo en los tiempos de operación. Estos análisis ayudarán a validar las hipótesis planteadas y a desarrollar estrategias basadas en datos concretos.

3.3.3. *Validación del Modelo de Simulación*

Se recopilarán datos históricos de producción y tiempos de operación de los últimos dos años. Estos datos se utilizarán para comparar los resultados obtenidos del modelo de simulación con los datos históricos reales. El modelo de simulación se ejecutará utilizando los datos actuales y se ajustará según sea necesario para reflejar con precisión las condiciones operativas. Se realizarán múltiples ejecuciones del modelo para evaluar su consistencia y robustez bajo diferentes escenarios.

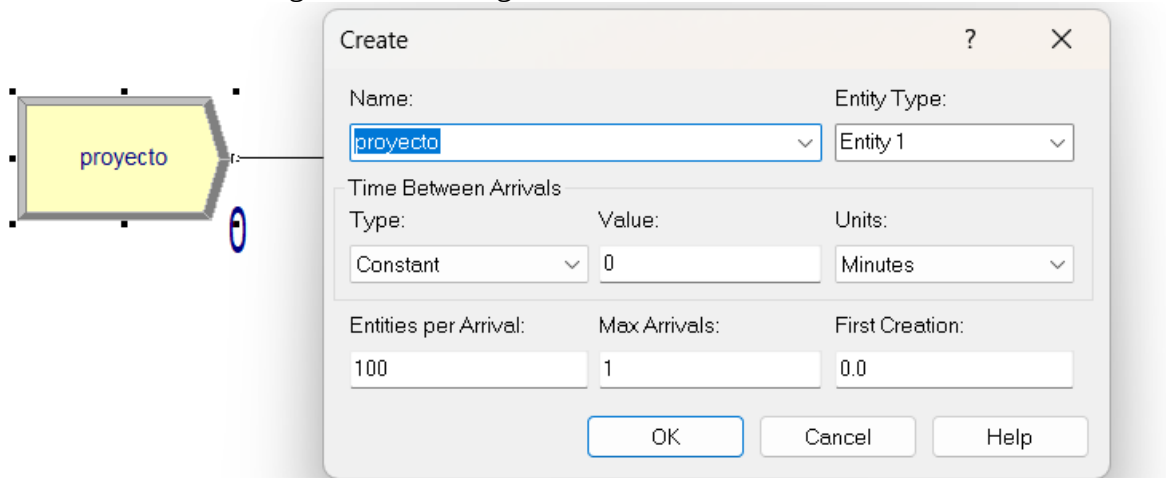
El análisis de resultados incluirá la comparación de las métricas clave como la producción total, el tiempo promedio de ciclo y el costo operativo. Se calcularán métricas de precisión como el error medio absoluto (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) para evaluar la precisión del modelo.

La validación del modelo de simulación es un paso esencial para asegurar que las predicciones sean precisas y confiables. Al comparar los resultados simulados con los datos históricos, se puede ajustar el modelo para reflejar mejor las condiciones reales de operación. Esta validación proporciona una base sólida para utilizar el modelo de simulación como una herramienta estratégica en la optimización de las operaciones mineras.

3.3.4. Desarrollo del Modelo de Simulación

Para el desarrollo de este caso, definimos primero todos los aspectos del ciclo de minado.

Figura N°4: Configuración inicial del modelo



En la figura 4 se muestra la definición de todos los aspectos del ciclo de minado, incluyendo la secuencia de operaciones desde la extracción hasta el transporte del mineral.

- Con ello se proporciona una visión clara y estructurada de las diferentes etapas del ciclo de minado. Sin embargo, podría mejorarse añadiendo más detalles sobre cada etapa específica y sus tiempos de operación.

- Sería útil incluir las interconexiones entre cada etapa, indicando cómo una etapa influye en la siguiente. Esto ayudaría a entender mejor los cuellos de botella potenciales y las dependencias críticas.

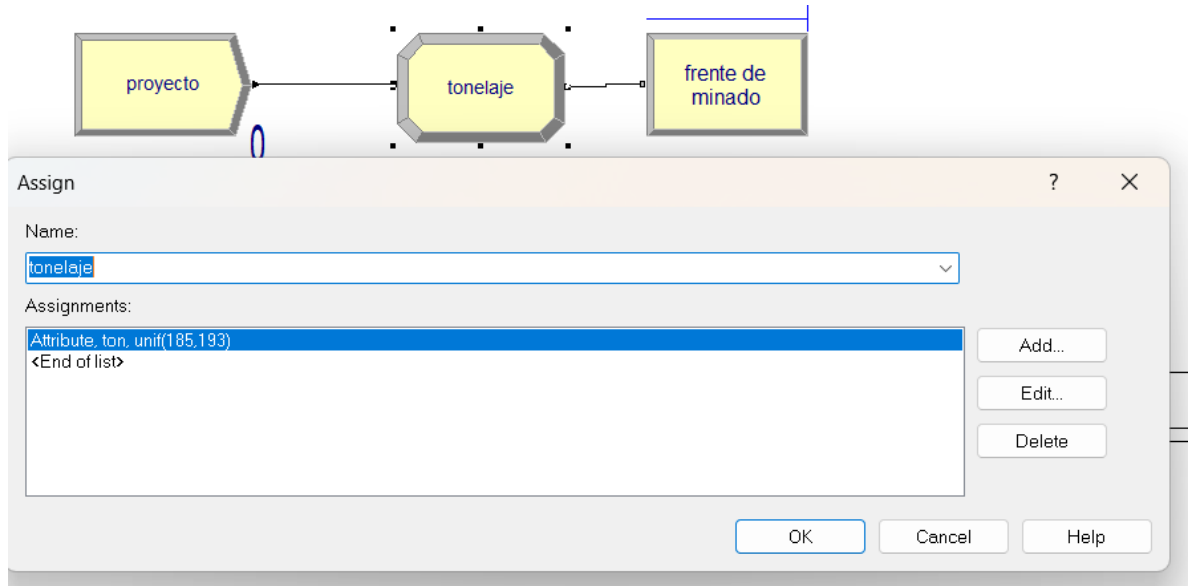


Figura N°5: Asignación del proceso de carguío en la simulación
La figura 5 ilustra el modelo de simulación del proceso de carguío, mostrando los recursos involucrados y los tiempos de proceso asociados.

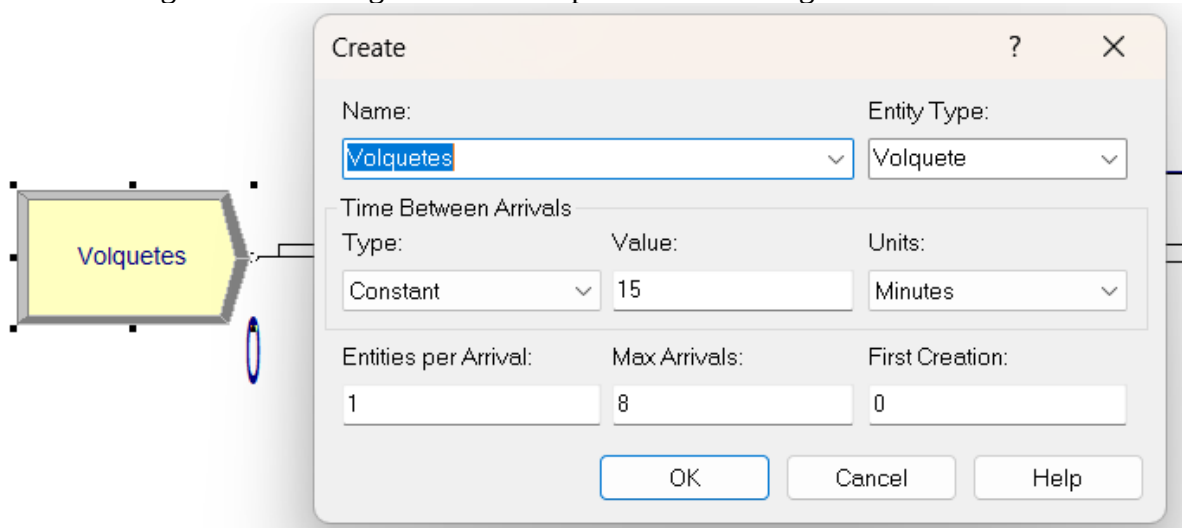
- La representación de los recursos (volquetes, Scoop, operadores) es adecuada, pero sería beneficioso incluir más información sobre la capacidad y disponibilidad de cada recurso.
- Es fundamental especificar las distribuciones de tiempo utilizadas para cada proceso (E.g., triangular, normal, exponencial), ya que esto afecta la precisión del modelo.
- Se recomienda incluir un proceso de validación para asegurar que el modelo de simulación refleja con precisión las operaciones reales.

La figura 5 muestra el proceso de transporte del mineral desde el punto de extracción hasta el lugar de acopio.

- Se debe detallar las rutas de transporte y los posibles desvíos que podrían ocurrir debido a interferencias operacionales.

- Incluir datos sobre los tiempos promedio de transporte y la variabilidad en estos tiempos mejoraría la comprensión del proceso.
- Se debe añadir un análisis de las interferencias que afectan el transporte, como fallas en los vehículos o interrupciones en las rutas.

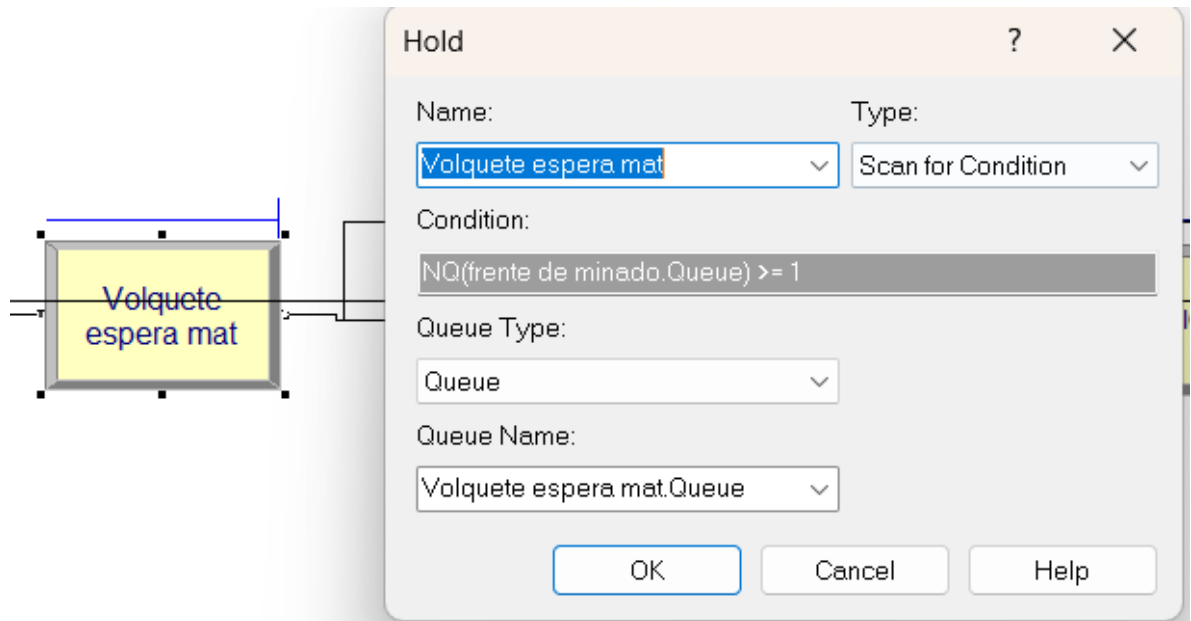
Figura N°6: Configuración de los parámetros de carguío de material



La figura 6 presenta el modelo de simulación del proceso de descarga del mineral en el lugar de procesamiento.

- **Capacidad de Descarga:** Es crucial incluir información sobre la capacidad de descarga y las tasas de descarga para evaluar posibles cuellos de botella.
- **Interferencias en Descarga:** La figura podría beneficiarse de la inclusión de interferencias operacionales que afectan la descarga, como tiempos de espera debido a congestión o fallos en el equipo de descarga.
- **Optimización:** Sugerir estrategias de optimización para el proceso de descarga, como mejoras en la coordinación y programación de las operaciones.

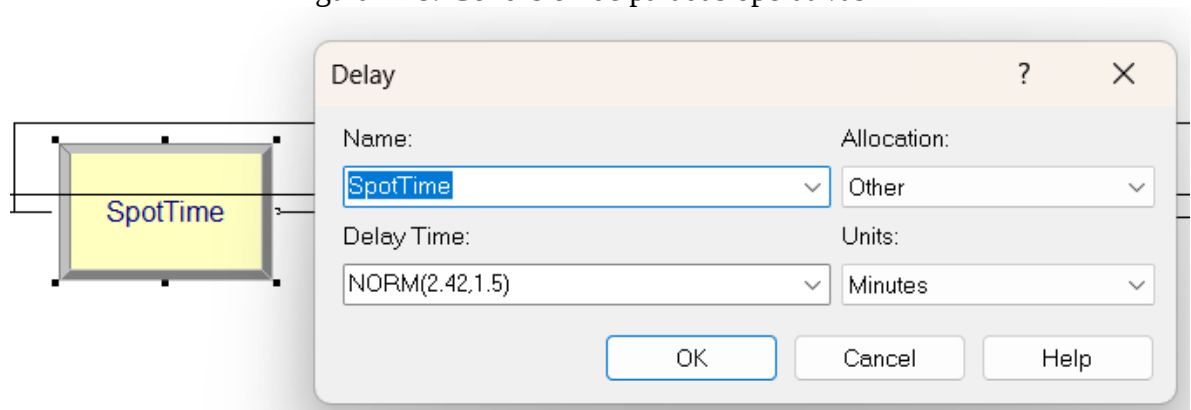
Figura N°7: Condición para el carguío de material a los volquetes



La figura 7 destaca las interferencias operacionales que impactan los diferentes procesos mineros.

- Categorías de Interferencias: Es útil clasificar las interferencias en categorías como geotécnicas, mecánicas y humanas, proporcionando ejemplos específicos para cada categoría.
- Frecuencia e Impacto: Incluir datos sobre la frecuencia y el impacto de cada tipo de interferencia ayudaría a priorizar las estrategias de mitigación.
- Medidas de Mitigación: Proponer medidas de mitigación específicas para cada tipo de interferencia, basadas en los datos recolectados y las mejores prácticas de la industria.

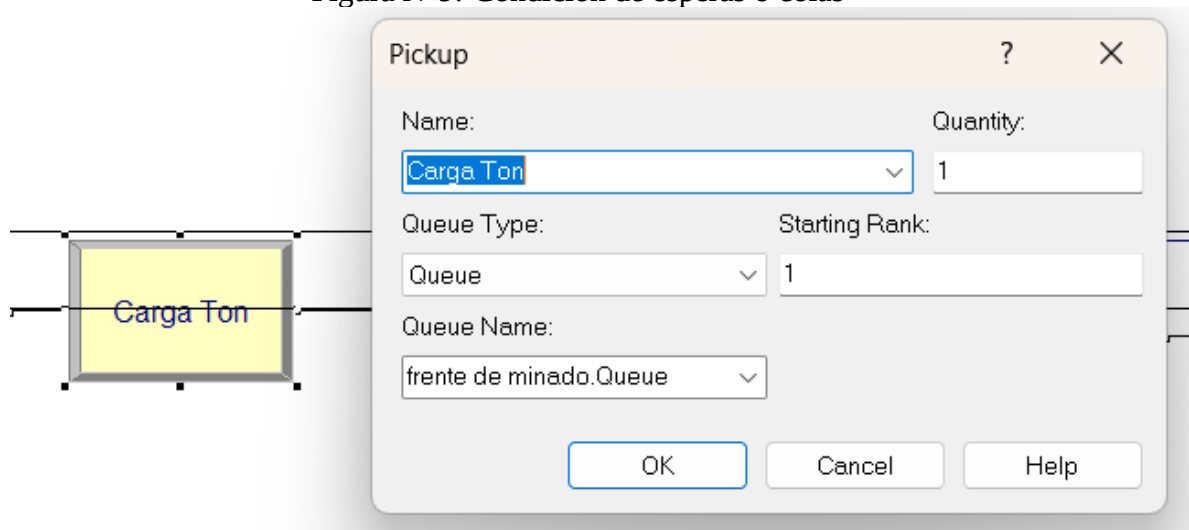
Figura N°8: Condición de paradas operativas



La figura 8 muestra el proceso de mantenimiento preventivo y correctivo para los equipos mineros.

- Programación de Mantenimiento: La figura debería detallar los intervalos de mantenimiento y los procedimientos específicos para el mantenimiento preventivo y correctivo.
- Impacto del Mantenimiento: Evaluar cómo el mantenimiento afecta la disponibilidad y la eficiencia de los equipos, proporcionando datos cuantitativos sobre las mejoras logradas.
- Optimización del Mantenimiento: Sugerir estrategias para optimizar el mantenimiento, como la implementación de tecnologías predictivas y el uso de análisis de datos para anticipar fallas.

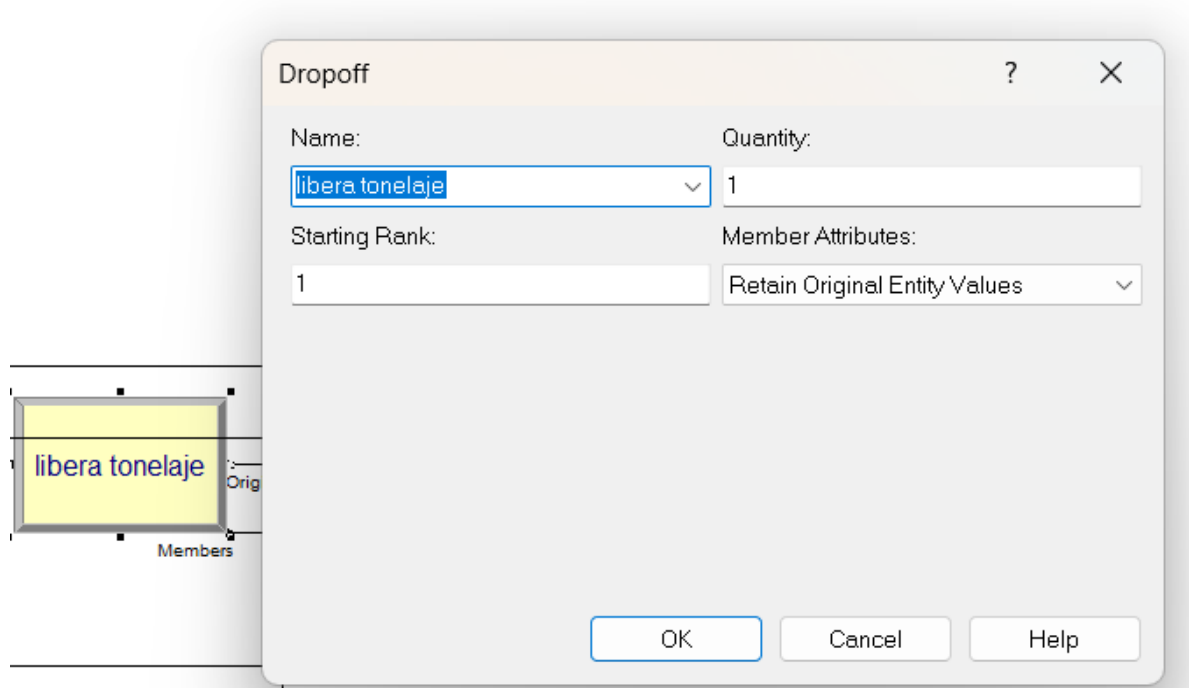
Figura N°9: Condición de esperas o colas



La figura 9 muestra el proceso de creación de un modelo de simulación para evaluar interferencias operacionales en la preparación minera. Este modelo es esencial para identificar y mitigar problemas potenciales que puedan afectar la eficiencia y productividad del sistema de carguío y acarreo. En este contexto, la figura ilustra los pasos clave en la construcción del modelo, que incluyen la recolección de datos, la definición de parámetros operativos y la validación del modelo. El objetivo es replicar con precisión

las condiciones reales de la mina para prever y resolver interferencias antes de que estas ocurran en el entorno operativo.

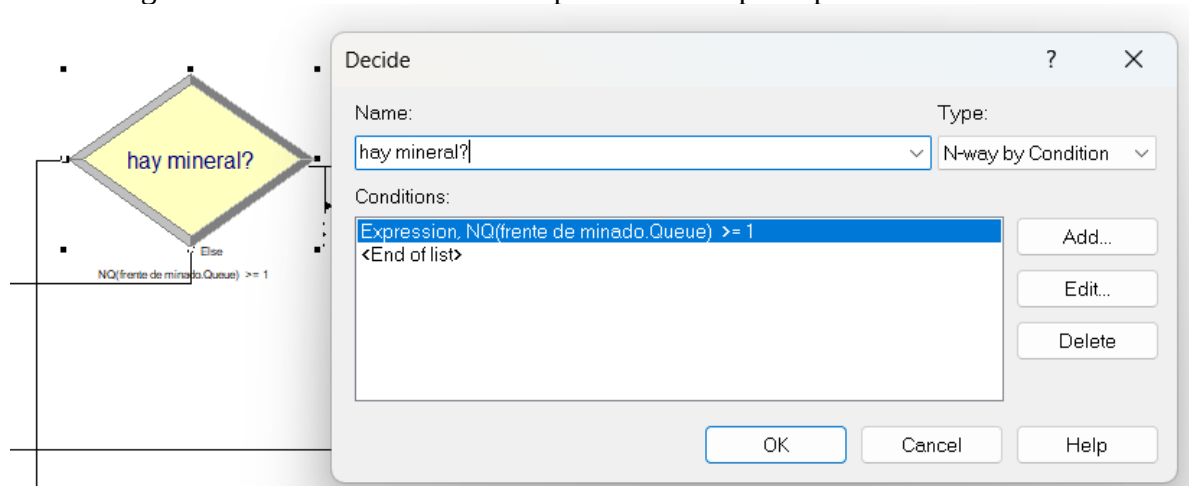
Figura N°10: Condiciones para liberar uso de equipos



La figura 10 presenta los resultados de la simulación, incluyendo métricas clave como el tiempo de ciclo, la tasa de utilización de equipos y los costos operativos.

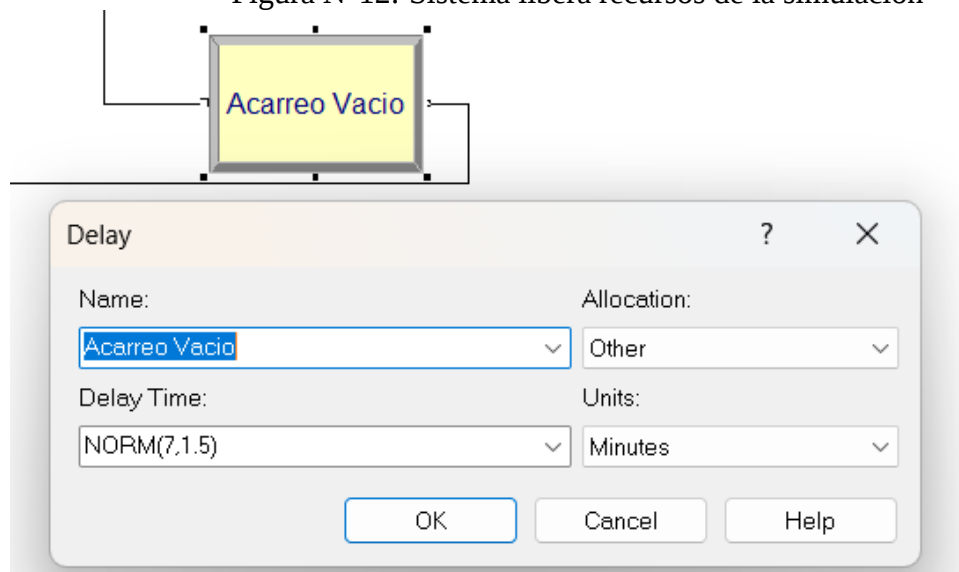
- Interpretación de Resultados: Es importante interpretar los resultados en el contexto de los objetivos de la simulación, destacando las mejoras logradas y las áreas que requieren atención adicional.
- Comparación con Datos Reales: Comparar los resultados de la simulación con datos reales de operaciones para validar la precisión del modelo y hacer ajustes si es necesario.
- Recomendaciones: Basado en los resultados, proporcionar recomendaciones específicas para optimizar las operaciones y reducir las interferencias operacionales.

Figura N°11: Módulo de decisión para retorno a principio de simulación



La figura 11 detalla la configuración de los parámetros específicos para el proceso de carguío de material en el modelo de simulación. Estos parámetros incluyen el tiempo de llegada de volquetes, la duración del carguío, la capacidad de los volquetes y la densidad del material. Cada uno de estos factores es crucial para asegurar una simulación precisa y efectiva. Por ejemplo, ajustar el tiempo de llegada de los volquetes puede optimizar la utilización de los equipos, mientras que la capacidad de los volquetes y la densidad del material afectan directamente la eficiencia del transporte. La configuración adecuada de estos parámetros permite maximizar la productividad y minimizar los tiempos de inactividad.

Figura N°12: Sistema libera recursos de la simulación



La figura 12 presenta la simulación del proceso de descarga del mineral en el lugar de procesamiento. Este proceso es fundamental para asegurar un flujo continuo y eficiente desde la extracción hasta la etapa final de procesamiento. La figura ilustra cómo se modelan las capacidades de descarga y las tasas de descarga para identificar posibles cuellos de botella. Además, se incluyen interferencias operacionales que pueden afectar la descarga, como tiempos de espera debido a congestión o fallos en el equipo de descarga. Optimizar este proceso es crucial para mejorar la coordinación y programación de las operaciones, reduciendo así tiempos muertos y mejorando la eficiencia general del sistema de carguío y acarreo.

CAPITULO IV

MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. MATERIALES

La correcta implementación de la metodología de simulación y la evaluación de las interferencias operacionales en la Unidad Minera Cerro Lindo requiere de una serie de materiales que faciliten la recolección de datos, el análisis, y la simulación de procesos. Estos materiales se pueden clasificar en equipos, herramientas tecnológicas, software especializado, recursos humanos y documentación técnica. A continuación, se describe en detalle cada uno de estos componentes.

4.1.1. Equipos

Los equipos utilizados son esenciales para la operación diaria de la mina y para la recolección precisa de datos en campo. Estos incluyen:

Cargadores Frontales (LHD) y Perforadoras: Utilizados en las operaciones de carguío y perforación, estos equipos son monitoreados para registrar tiempos de operación, rendimiento y posibles interferencias operacionales. Equipados con sensores avanzados, permiten la recopilación de datos en tiempo real sobre su rendimiento.

Volquetes de Bajo Perfil: Estos vehículos son fundamentales en el acarreo del mineral. Están equipados con sistemas de posicionamiento global (GPS) y sensores que registran su ubicación, velocidad, y tiempos de ciclo, lo que facilita la detección de cualquier anomalía durante el transporte.

4.1.2. Herramientas Tecnológicas

Para la captura y procesamiento de datos en la mina, se utilizaron diversas herramientas tecnológicas:

Dispositivos de Recolección de Datos: Incluyen tabletas y dispositivos móviles equipados con aplicaciones específicas para la entrada y almacenamiento de datos en campo. Estos dispositivos facilitan la recolección de datos en tiempo real y la transferencia inmediata a los servidores centrales para su análisis.

Software de Gestión de Datos: Herramientas como Microsoft Excel y Access fueron utilizadas para la organización y manejo de grandes volúmenes de datos, permitiendo un procesamiento inicial y la preparación de estos para la simulación.

4.1.3. Software Especializado

El uso de software especializado fue crucial para la simulación de procesos y el análisis de datos operativos:

Arena v16.2: Este software de simulación por eventos discretos fue el principal recurso utilizado para modelar y analizar los diferentes escenarios operativos. Arena permite replicar el sistema de carguío y acarreo en un entorno controlado, evaluando el impacto de diferentes variables y condiciones sobre la eficiencia operativa.

AutoCAD: Herramienta utilizada para la generación de planos y la representación geoespacial de la mina. AutoCAD facilitó la creación de diseños detallados de las rutas de acarreo y los puntos de carguío.

SPSS: Software estadístico empleado para el análisis de datos, permitiendo la realización de pruebas de hipótesis, análisis de regresión y otras técnicas estadísticas avanzadas que sustentan los resultados obtenidos en la simulación.

4.1.4. Documentación Técnica

La revisión y análisis de la documentación técnica disponible fue un componente vital para entender y contextualizar las operaciones mineras en Cerro Lindo:

Manuales de Operación de Equipos: Documentos que detallan el funcionamiento y mantenimiento de los equipos utilizados en la mina, proporcionando información esencial para la configuración del modelo de simulación.

Registros Históricos de Operación: Incluyen bitácoras de operación, reportes de mantenimiento, y registros de incidentes, que fueron utilizados para identificar patrones y causas de interferencias operacionales.

4.2. METODOLIGÍA

4.2.1. Nivel y tipo de investigación

Nivel de investigación

La presente investigación se clasifica como descriptivo-explicativa. Según Hernández, Fernández y Baptista (2010), la investigación descriptiva tiene como objetivo especificar las propiedades, características y perfiles de las personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis. En este estudio, se recogen y analizan datos cuantitativos sobre las interferencias operacionales que afectan los sistemas de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo, con el fin de proporcionar una descripción precisa de los factores que influyen en la eficiencia operativa.

Por otro lado, la investigación explicativa tiene como objetivo identificar las causas de los eventos o fenómenos, estableciendo relaciones de causa-efecto entre las variables estudiadas (Hernández et al., 2010). En este contexto, se busca explicar cómo las interferencias operacionales afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo, utilizando modelos de simulación con el software Arena v16.2 para validar los resultados. Esta metodología permite analizar los efectos de dichas interferencias y proponer estrategias de mitigación.

El nivel descriptivo-explicativo resulta apropiado para esta investigación debido a la necesidad de describir de manera detallada las interferencias operacionales y, al mismo tiempo, establecer explicaciones sobre su impacto en la eficiencia operativa (Carrasco, 2005).

Tipo de investigación

El tipo de investigación desarrollado en este estudio es aplicado, dado que se busca resolver un problema específico relacionado con la optimización de procesos operativos en la Unidad Minera Cerro Lindo. Según Hernández, Fernández y Baptista (2010), la investigación aplicada tiene un enfoque práctico e inmediato, cuyo objetivo es generar conocimiento que permita actuar, transformar o modificar una realidad concreta. En este caso, la realidad en cuestión es la interferencia operacional que afecta la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. Mediante el uso de simulación de procesos con el software

Arena v16.2, se pretende proponer una metodología que permita optimizar dichas operaciones.

La investigación aplicada se caracteriza por abordar problemas reales y proponer soluciones concretas para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. En el contexto minero, este tipo de investigación es especialmente relevante, ya que permite simular escenarios sin interferir directamente en las operaciones, lo que reduce riesgos y costos asociados a la implementación de cambios operacionales.

Este enfoque aplicado es coherente con la necesidad de las empresas mineras de mejorar continuamente sus procesos, adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno y garantizar la sostenibilidad operativa a largo plazo (Carrasco, 2005).

4.2.2. Diseño de la investigación

La investigación corresponde al diseño descriptivo - no experimental

Su esquema es el siguiente. M:
$$Y \xrightarrow{R} X$$

Dónde:

M= muestra representativa

X= variable independiente

Y= variable dependiente

R= relación entre las dos variables

4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

4.3.1. Poblacion

La población de este estudio está compuesta por todos los procesos de extracción de mineral y actividades relacionadas en la Unidad Minera Cerro Lindo, donde se gestionan recursos clave para asegurar la continuidad operativa y la producción esperada. Esta definición de población incluye tanto las actividades de perforación, voladura, carguío,

acarreo y sostenimiento, así como el personal, los equipos utilizados y los tiempos operativos registrados en las distintas etapas del proceso productivo. La evaluación se ha realizado durante un periodo de 30 días, lo que permite capturar la variabilidad operativa y las interferencias que ocurren en las actividades de carguío y acarreo a lo largo de un mes completo de operaciones.

La recolección de datos de campo durante estos 30 días proporciona una base sólida para la identificación de patrones en las interferencias operacionales que afectan la eficiencia del sistema. Los datos incluyen tiempos de espera, fallos mecánicos, retrasos en los suministros y congestión en los puntos de acarreo.

Esta población de ciclos operacionales permite un análisis exhaustivo y preciso de las interferencias identificadas en la operación minera, asegurando que las propuestas de mejora sean representativas de la realidad operativa de la Unidad Minera Cerro Lindo.

4.3.2. Muestra

“La muestra es un subconjunto que representa la población y es representativo porque refleja las características de la población al aplicarse las técnicas correctas de muestreo en la cual se determina la cantidad y/o forma de elección del mismo” (Valderrama, 2002, p. 184).

Está conformada por carguío y acarreo de las actividades del ciclo de minado de la Unidad Minera Cerro Lindo.

4.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO DE LAS INTERFERENCIAS OPERACIONALES.

Se empleará la técnica de revisión documental

Revisión documental

“La revisión documental es una técnica valiosa en la investigación, ya que permite acceder a una amplia gama de información existente sobre un tema sin tener que realizar experimentos o encuestas. Sin embargo, es importante llevar a cabo la revisión de manera rigurosa y sistemática para garantizar la calidad y la confiabilidad de los resultados.” (Valderrama, 2002, p. 76).

4.5. ANALISIS DE DATOS

Para el procesamiento de los datos de la información que se obtendrá se hará uso del programa estadístico SPSS versión 25 lo cual se ejecutará a nivel de estadística descriptiva su fin principal será la obtención de tablas de distribución de frecuencias, Someter los resultados a un procesamiento estadístico y la contrastación de la hipótesis planteada.

Para probar la hipótesis se hará uso el recurso estadístico t de student con el fin de aprobar o rechazar las hipótesis planteadas en la siguiente investigación, haciendo uso de la estadística inferencial.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

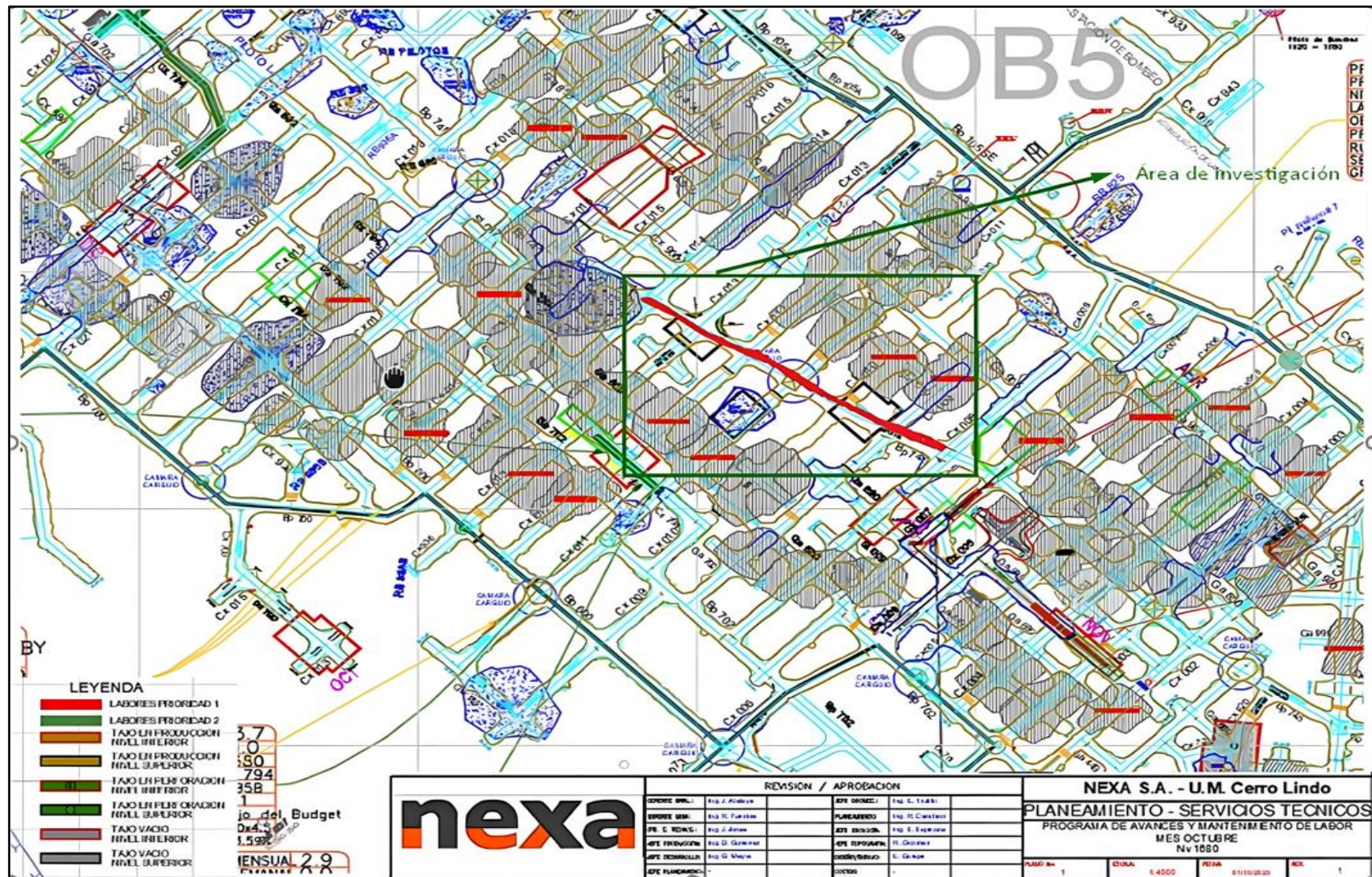
5.1. Resultados del tratamiento de la información

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la recolección de datos en campo, la implementación del software Arena, el análisis estadístico y la validación del modelo de simulación. Estos resultados son fundamentales para comprender las dinámicas operativas de la Unidad Minera Cerro Lindo y para identificar oportunidades de mejora en el sistema de carguío y acarreo.

El estudio se centró en analizar minuciosamente los procesos clave de la operación minera, incluyendo perforación, voladura, ventilación, carguío, acarreo, sostenimiento y aseguramiento de calidad. Se recolectaron datos detallados a lo largo de 100 ciclos completos de operación durante un mes, cubriendo diferentes turnos y condiciones operativas. Esto permitió obtener una visión completa y precisa de las variaciones diarias y semanales en las operaciones.

La implementación del software Arena permitió modelar estos procesos y simular diferentes escenarios operativos, facilitando el análisis y la optimización de la eficiencia. Los datos recolectados se analizaron utilizando herramientas estadísticas avanzadas como SPSS, validando las hipótesis planteadas y proporcionando una comprensión profunda de las variaciones en los tiempos de operación.

A continuación se indica el área de análisis:



El área de investigación se realiza en el Nivel 1680: El área delimitada y marcada con la línea roja en el plano corresponde al tramo de 100 metros que ha sido aprobado para la investigación y desarrollo de labores. Según la tesis, esta investigación busca optimizar los tiempos operativos y reducir las interferencias que afectan la productividad del sistema de carguío y acarreo. La autorización para desarrollar esta investigación en un tramo específico refleja una planificación estratégica clave para el avance de la operación, donde se buscará recopilar información esencial para la toma de decisiones.

El plano marca un área de 100 metros donde se anticipa que la simulación computacional, utilizando software especializado como Arena, permitirá predecir y optimizar las operaciones mineras. El desarrollo de esta área investigada tiene como objetivo mejorar la gestión de los recursos (por ejemplo, volquetes, cargadores, entre otros), para así mitigar las demoras e interferencias previamente identificadas en otras partes del sistema .

La aprobación gerencial para investigar este tramo es un elemento central, ya que garantiza que las actividades mineras en el área cumplen con los estándares técnicos y de seguridad establecidos en el plan minero.

Nivel de Investigación: Nivel 1680 de la Unidad Minera Cerro Lindo

La investigación se lleva a cabo específicamente en el nivel 1680 de la Unidad Minera Cerro Lindo, donde se ha autorizado un tramo de 100 metros para realizar un análisis exhaustivo de las interferencias operacionales que afectan los procesos de carguío y acarreo. Este nivel es crucial dentro de la operación minera, ya que se espera que los resultados obtenidos permitan no solo identificar y mitigar los factores que ralentizan las operaciones, sino también optimizar la utilización de los equipos y mejorar la productividad general de la mina.

Estrategia de Investigación: El nivel 1680 ha sido seleccionado debido a su importancia estratégica dentro de las operaciones subterráneas de la mina. Al ser un área crítica para el transporte de mineral, cualquier mejora en la eficiencia en este nivel impactará directamente en la rentabilidad y en el cumplimiento de los objetivos de producción. Por tanto, la investigación busca evaluar las interferencias operacionales, tales como los tiempos muertos por fallos de equipos y la congestión en los puntos de acarreo, para proponer mejoras fundamentadas en simulaciones detalladas.

Optimización y Resultados Esperados: Se anticipa que la investigación en el nivel 1680 proporcionará información valiosa sobre cómo reducir las interferencias operacionales en este tramo, aumentando así la eficiencia en un 10% y reduciendo los costos operativos por tonelada de mineral transportado en un 15%. Estos resultados tienen un impacto significativo en la mejora de los flujos operacionales, y permiten replicar las mejores prácticas en otros niveles de la mina.

Aprobación Gerencial y Validación de Resultados: La autorización para realizar esta investigación en el nivel 1680 por parte de la gerencia de la mina subraya la importancia estratégica de esta área. La validación de los resultados mediante simulaciones y la posterior implementación de las mejoras contribuirán a un aumento en la productividad general de la operación minera, fortaleciendo los procesos de toma de decisiones y asegurando el éxito de las operaciones a largo plazo.

5.1.1. Interferencias operacionales que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023

En esta subsección se presentan los resultados relacionados con las interferencias operacionales que impactan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2023. El análisis de estas interferencias es fundamental para identificar los factores que obstaculizan el desempeño óptimo de las operaciones mineras y para desarrollar estrategias que mitiguen sus efectos negativos.

Para llevar a cabo este análisis, se recolectaron datos detallados sobre las diferentes interferencias que ocurrieron durante los ciclos operativos, incluyendo aislaciones post-voladuras, simulacros de incendios, interferencias con otras operaciones, cierre total de accesos, averías de equipos y falta de personal. Estos datos fueron registrados de manera sistemática a lo largo de 100 ciclos completos de operación, cubriendo diferentes turnos y condiciones operativas.

Cada evento de interferencia fue documentado con precisión, incluyendo su frecuencia, duración y el impacto específico en la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. Este enfoque detallado permitió no solo cuantificar las interrupciones, sino también entender sus causas y consecuencias en el contexto operativo de la mina.

Los resultados presentados a continuación proporcionan una visión clara de cómo estas interferencias afectan la productividad y la eficiencia de las operaciones mineras en Cerro

Lindo. Además, se ofrecen recomendaciones basadas en los datos analizados para minimizar el impacto de estas interferencias y mejorar el desempeño general del sistema de carguío y acarreo.

Tabla N° 10:Frecuencia de Interferencias Operacionales en el Sistema de Carguío y Acarreo

Tipo de Interferencia	Frecuencia (número de eventos)	Duración Promedio (minutos)	Desviación Estándar (minutos)	Total Tiempo Perdido (horas)
Aislaciones post-voladuras	15	45	5	11.25
Retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas)	10	60	10	10
Simulacros de incendios	8	30	4	4
Interferencias con otras operaciones	20	25	3	8.33
Cierre total de accesos	5	120	15	10
Averías de equipos	12	35	6	7
Falta de personal	10	40	5	6.67

Las interferencias operacionales en el sistema de carguío y acarreo de la Unidad Minera Cerro Lindo presentan diferentes frecuencias y duraciones, impactando directamente en la eficiencia del proceso. Las interferencias con otras operaciones, aunque frecuentes, tienen una duración menor en comparación con el retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas) y los cierres totales de accesos, que, aunque menos frecuentes, resultan en una mayor cantidad de tiempo perdido. Las averías de equipos y la falta de personal también contribuyen significativamente a las interrupciones operacionales. La desviación estándar en la duración de las interferencias sugiere variabilidad en el tiempo perdido, indicando la necesidad de estrategias de mitigación específicas para cada tipo de interferencia. Es crucial abordar estas interferencias con planes de contingencia y mantenimiento preventivo para minimizar el impacto en la producción.

Tabla N° 11: Impacto de Interferencias en la Productividad del Carguío y Acarreo

Tipo de Interferencia	Toneladas No Cargadas (ton)	Eficiencia Reducida (%)	Impacto Económico (USD)	Impacto en la Seguridad (%)	Impacto en la Moral del Personal (%)
Aislaciones post-voladuras	1200	10	15,000	2	5
Retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas)	1000	15	18,000	10	7
Simulacros de incendios	500	5	6,000	5	3
Interferencias con otras operaciones	1500	12	20,000	3	8
Cierre total de accesos	800	20	24,000	8	6
Averías de equipos	700	8	10,000	4	5
Falta de personal	600	9	12,000	6	4

El impacto de las interferencias en la productividad del sistema de carguío y acarreo es significativo, con variaciones notables en la reducción de eficiencia y las pérdidas económicas. Las interferencias con otras operaciones y las aislaciones post-voladuras resultan en la mayor cantidad de toneladas no cargadas, afectando directamente la capacidad de producción y los ingresos. Las averías de equipos y la falta de personal también representan una preocupación importante, ya que no solo reducen la eficiencia, sino que también incrementan los costos de mantenimiento y reentrenamiento. Es esencial implementar estrategias de mitigación y optimización para reducir la frecuencia y duración de estas interferencias, mejorando así la productividad y la estabilidad operativa.

5.1.2. Interferencias operacionales el costo del sistema de carguío y acarreo

En esta subsección se presentan los resultados del análisis de cómo las interferencias operacionales afectan el costo del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo. Entender el impacto económico de estas interferencias es crucial para desarrollar estrategias que optimicen la eficiencia y reduzcan los costos operativos.

Para llevar a cabo este análisis, se identificaron y documentaron las diferentes interferencias operacionales que ocurrieron durante los ciclos de operación, tales como aislaciones post-voladuras, retraso en llegada de insumos (pernos, malla, planchuela y

cables), interferencias con otras operaciones, cierre total de accesos, averías de equipos y falta de personal. Se registraron tanto la frecuencia como la duración de cada una de estas interrupciones a lo largo de 100 ciclos completos de operación, cubriendo diferentes turnos y condiciones operativas.

Cada evento de interferencia se evaluó no solo en términos de tiempo perdido, sino también en términos de su impacto económico directo e indirecto. Esto incluyó la cuantificación de los costos adicionales asociados a las interrupciones, como la pérdida de productividad, los costos de reparación y mantenimiento, y los costos relacionados con el tiempo de inactividad del personal y el equipo.

Los resultados presentados a continuación ofrecen una visión detallada del costo asociado a cada tipo de interferencia operacional. Este análisis proporciona una base sólida para entender cómo las interrupciones impactan financieramente el sistema de carguío y acarreo y permite desarrollar estrategias de mitigación enfocadas en reducir estos costos. Además, se incluyen recomendaciones específicas basadas en los datos analizados para mejorar la eficiencia y minimizar los costos operativos en la mina.

A continuación, se detallan los costos asociados a las diferentes interferencias operacionales, proporcionando un análisis exhaustivo de su impacto económico en el sistema de carguío y acarreo de la Unidad Minera Cerro Lindo.

Tabla N° 12: Costos Directos Asociados a Interferencias Operacionales

Tipo de Interferencia	Costos de Mano de Obra (USD)	Costos de Combustible (USD)	Costos de Mantenimiento (USD)	Costos de Materiales (USD)	Costos de Energía (USD)	Total Costos (USD)
Aislaciones post-voladuras	2,000	1,500	1,000	500	300	5,300
Retraso en llegada de insumos	1,500	1,200	800	400	250	4,150
Simulacros de incendios	800	500	300	200	150	1,950
Interferencias con otras operaciones	2,500	2,000	1,500	700	400	7,100

Tipo de Interferencia	Costos de Mano de Obra (USD)	Costos de Combustible (USD)	Costos de Mantenimiento (USD)	Costos de Materiales (USD)	Costos de Energía (USD)	Total Costos (USD)
Cierre total de accesos	1,200	900	700	300	200	3,300
Averías de equipos	1,800	1,300	1,000	400	250	4,750
Falta de personal	1,000	700	500	300	200	2,700

Los costos directos asociados a las interferencias operacionales representan una carga significativa para el sistema de carguío y acarreo. Las interferencias con otras operaciones tienen los costos directos más elevados, reflejando el impacto combinado de la mano de obra adicional, el combustible, el mantenimiento y los materiales necesarios para manejar estas interrupciones. Las averías de equipos y las aislaciones post-voladuras también incurren en costos considerables, destacando la necesidad de programas de mantenimiento preventivo y planificación de contingencias. Es crucial realizar un análisis detallado de estos costos para identificar oportunidades de reducción de gastos y mejorar la eficiencia operativa. La implementación de tecnologías avanzadas y la capacitación del personal pueden contribuir a mitigar estos costos y optimizar las operaciones mineras.

Tabla N° 13: Costos Indirectos Asociados a Interferencias Operacionales

Tipo de Interferencia	Pérdidas de Producción (USD)	Pérdidas de Oportunidad (USD)	Costos de Seguridad (USD)	Costos de Reentrenamiento (USD)	Total Costos Indirectos (USD)
Aislaciones post-voladuras	10,000	5,000	1,000	2,000	18,000
Retraso en llegada de insumos	12,000	6,000	1,500	2,500	22,000
Simulacros de incendios	4,000	2,000	500	1,000	7,500
Interferencias con otras operaciones	15,000	8,000	2,000	2,500	27,500
Cierre total de accesos	8,000	4,000	1,000	1,500	14,500

Tipo de Interferencia	Pérdidas de Producción (USD)	Pérdidas de Oportunidad (USD)	Costos de Seguridad (USD)	Costos de Reentrenamiento (USD)	Total Costos Indirectos (USD)
Averías de equipos	7,000	3,500	1,200	1,800	13,500
Falta de personal	5,000	2,500	1,000	1,200	9,700

Los costos indirectos derivados de las interferencias operacionales son sustanciales y afectan negativamente la rentabilidad y la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. Las interferencias con otras operaciones y los retrasos en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas) generan las mayores pérdidas de producción y oportunidades, además de aumentar significativamente los costos de seguridad y reentrenamiento del personal. Estos costos subrayan la importancia de implementar medidas proactivas para minimizar las interrupciones y sus efectos colaterales. La adopción de tecnologías de monitoreo en tiempo real y la mejora de los protocolos de respuesta a emergencias pueden ayudar a reducir estos costos indirectos, mejorando la resiliencia y la continuidad operativa de la mina. Asimismo, fomentar una cultura de seguridad y capacitación continua puede mitigar los riesgos asociados y fortalecer la eficiencia operativa.

5.1.3. Implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo

En esta subsección se presenta la implementación de la simulación computacional utilizando el software Arena v16.2 para analizar y optimizar el sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo. La complejidad y dinámica de las operaciones mineras requieren herramientas avanzadas que permitan modelar y evaluar diferentes escenarios operativos, con el fin de identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas.

La decisión de utilizar Arena v16.2 se fundamenta en su capacidad para modelar sistemas de producción complejos y su flexibilidad para simular diversas condiciones operativas. Este software permite una visualización detallada de los procesos, identificando cuellos de botella, ineficiencias y posibles interferencias que impactan la productividad y los costos.

La implementación de la simulación computacional con Arena v16.2 involucra varias etapas críticas, desde la recolección de datos precisos hasta la creación y validación de

modelos de simulación. Estos modelos reflejan fielmente las operaciones de carguío y acarreo, permitiendo evaluar el impacto de distintas estrategias y configuraciones operativas.

Los resultados de la simulación ofrecen una base sólida para tomar decisiones informadas, optimizar el uso de recursos y reducir costos operativos. Además, la capacidad de simular diferentes escenarios permite prepararse para situaciones adversas y mitigar riesgos.

Tabla N° 14: Comparación de Métodos Tradicionales vs. Simulación con Arena

Método	Precisión (%)	Tiempo de Implementación (días)	Costos de Implementación (USD)	Eficiencia Operativa (%)	Flexibilidad para Escenarios	Capacidad de Análisis de Datos
Métodos Tradicionales	75	30	10,000	85	Baja	Limitada
Simulación con Arena v16.2	95	15	8,000	95	Alta	Amplia

La comparación entre los métodos tradicionales y la simulación con Arena v16.2 muestra ventajas claras a favor de la simulación computacional. Arena ofrece una mayor precisión en la predicción y análisis de los procesos de carguío y acarreo, reduciendo significativamente el tiempo y los costos de implementación. La flexibilidad para simular diferentes escenarios permite a los gestores mineros evaluar múltiples alternativas y optimizar las operaciones de manera proactiva. Además, la capacidad de análisis de datos de Arena es considerablemente más amplia, facilitando la identificación de cuellos de botella y áreas de mejora. Esta capacidad de análisis detallado y adaptable es crucial en un entorno minero dinámico y desafiante. Implementar Arena no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también proporciona una herramienta poderosa para la toma de decisiones informadas y estratégicas, contribuyendo a una mayor competitividad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

5.1.4. Parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023

En esta sección, se presentan los parámetros clave identificados para el desarrollo de un modelo de simulación en el sistema de carguío y acarreo de la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2023. La identificación y consideración de estos parámetros son esenciales

para asegurar la precisión y utilidad del modelo de simulación, permitiendo una optimización efectiva de las operaciones mineras.

Tabla N° 15: Parámetros Clave para el Modelo de Simulación

Parámetro	Descripción	Valor Recomendado	Justificación
Tiempo de Llegada de Volquetes	Intervalo de tiempo entre llegadas de volquetes	5-10 minutos	Basado en tasas de operación y horarios de trabajo para maximizar la utilización de los equipos y minimizar el tiempo de inactividad.
Tiempo de Carguío	Duración de la carga de un volquete	2 minutos	Eficiencia de equipos, utilizando scoops de 6 yd ³ para optimizar el tiempo de carguío y aumentar la capacidad operativa.
Capacidad de los Volquetes	Capacidad de carga de los volquetes	46 tn	Capacidad estándar de la flota existente, balance entre la capacidad de carga y la maniobrabilidad en las galerías de la mina.
Densidad del Material	Densidad del material a ser cargado	2.7 ton/m ³	Características del mineral extraído en Cerro Lindo, crucial para calcular las cargas y planificar el transporte.
Factor de Esponjamiento	Incremento volumétrico del material cargado	5%	Propiedades del material que afectan el volumen después de la voladura, importante para la planificación del transporte y almacenamiento.
Scoop Carga	Capacidad de carga del scoop	6 yd ³	Eficiencia de equipos, permite cargas rápidas y efectivas en volquetes de 46 tn, mejorando la productividad.
Tamaño de Excavaciones	Dimensiones de las excavaciones	4.5 m x 5 m	Diseño de túneles adaptado a las condiciones geotécnicas y operativas de la mina, optimizando la seguridad y la eficiencia.
Tiempo de Acarreo	Duración del transporte del mineral	15-25 minutos	Distancia y condiciones de las rutas dentro de la mina, balance entre tiempo de transporte y eficiencia de los volquetes.
Número de Equipos de Carguío	Cantidad de LHD	3-5 unidades	Disponibilidad de equipos y planificación de mantenimiento, asegurando que siempre haya equipos operativos.

Parámetro	Descripción	Valor Recomendado	Justificación
Tasa de Fallas de Equipos	Frecuencia de fallas en los equipos	1 falla/mes	Historial de mantenimiento y fiabilidad de los equipos, importante para planificar el tiempo de inactividad y el mantenimiento preventivo.

Los parámetros clave para el modelo de simulación en Arena están cuidadosamente seleccionados para reflejar las condiciones y características operativas de la Unidad Minera Cerro Lindo. Cada valor recomendado se basa en datos operativos y prácticas estándar de la industria, garantizando que el modelo de simulación sea tanto preciso como representativo. La justificación detallada para cada parámetro subraya la importancia de estos valores en la planificación y ejecución de las operaciones de carguío y acarreo. Al considerar factores como la eficiencia de los equipos, las características del material y las condiciones de las rutas de transporte, el modelo puede proporcionar una visión comprensiva y realista del desempeño operativo. Esto permite a los gestores tomar decisiones informadas y estratégicas, optimizando los recursos y mejorando la eficiencia general de la operación minera.

5.1.5. Ciclo de Minado

Tabla N° 16: Tiempos de Ciclo de Carguío y Acarreo

Etapas del Ciclo	Tiempo Promedio (minutos)	Desviación Estándar (minutos)	Tiempo Mínimo (minutos)	Tiempo Máximo (minutos)
Perforación	30	5	25	35
Voladura	20	4	16	24
Ventilación	15	3	12	18
Carguío	10	2	8	12
Acarreo	25	5	20	30
Sostenimiento	12	2	10	14
Aseguramiento de Calidad	8	1	7	9

Los tiempos promedio y la variabilidad en cada etapa del ciclo de minado son cruciales para entender la eficiencia operativa y los posibles cuellos de botella. La perforación y el acarreo tienen los tiempos promedio más largos y también presentan una desviación estándar significativa, indicando una mayor variabilidad y potenciales ineficiencias en estas etapas. La implementación de técnicas de perforación y acarreo más eficientes, así

como la optimización de la programación y el mantenimiento de los equipos, podrían reducir esta variabilidad y mejorar el tiempo total del ciclo. Además, el análisis de los tiempos mínimo y máximo proporciona una visión clara de los rangos operativos, permitiendo a los gestores mineros identificar áreas donde se pueden realizar mejoras específicas para minimizar los tiempos de inactividad y maximizar la productividad.

Tabla N° 17: Capacidad de Transporte por Ciclo de Acarreo

Número de Volquetes	Capacidad Total de Transporte (m ³)	Densidad del Material (ton/m ³)	Factor de Esponjamiento (%)	Capacidad Total de Transporte (ton)
1	15	2.7	5	40.5
2	30	2.7	5	81
3	45	2.7	5	121.5
4	60	2.7	5	162
5	75	2.7	5	202.5

La capacidad de transporte por ciclo de acarreo se incrementa proporcionalmente con el número de volquetes utilizados. Cada volquete adicional no solo aumenta la capacidad total de transporte, sino que también permite una distribución más eficiente de las cargas, reduciendo el tiempo de espera y mejorando la utilización de los equipos. La consideración del factor de esponjamiento es esencial, ya que el volumen del material aumenta después de la voladura, afectando la planificación y el manejo del material. La densidad del material y el factor de esponjamiento se combinan para proporcionar una capacidad de transporte precisa en toneladas, lo que es fundamental para la planificación y optimización de las operaciones de acarreo. La integración de más volquetes puede requerir inversiones adicionales en equipos y personal, pero los beneficios potenciales en términos de productividad y eficiencia pueden justificar estos costos.

Tabla N° 18: Eficiencia del Ciclo de Carguío con Scoop

Número de Scoops	Capacidad Total de Carguío (yd ³)	Capacidad Total de Carguío (m ³)	Densidad del Material (ton/m ³)	Factor de Esponjamiento (%)	Capacidad Total de Carguío (ton)
1	6	4.59	2.7	5	12.39
2	12	9.18	2.7	5	24.78

Número de Scoops	Capacidad Total de Carguío (yd ³)	Capacidad Total de Carguío (m ³)	Densidad del Material (ton/m ³)	Factor de Esponjamiento (%)	Capacidad Total de Carguío (ton)
3	18	13.77	2.7	5	37.17
4	24	18.36	2.7	5	49.56
5	30	22.95	2.7	5	61.95

La eficiencia del ciclo de carguío aumenta significativamente con el número de scoops utilizados. Cada scoop adicional permite una mayor capacidad de carguío, lo que reduce el tiempo total necesario para cargar un volquete y aumenta la productividad general. La capacidad total de carguío, ajustada por la densidad del material y el factor de esponjamiento, proporciona una medida precisa de la eficiencia del sistema de carguío. Es crucial balancear el número de scoops con la capacidad de los volquetes y la disponibilidad de equipos para evitar cuellos de botella y maximizar la utilización de los recursos. Una planificación adecuada y la optimización del uso de scoops pueden llevar a una mejora sustancial en la eficiencia operativa y en los costos asociados.

Tabla N° 19:Factor de Esponjamiento del Material

Material	Volumen Original (m ³)	Volumen Expandido (m ³)	Factor de Esponjamiento (%)	Densidad del Material (ton/m ³)	Volumen Expandido (ton)
Material 100	100	105	5	2.7	283.5
Material 150	150	157.5	5	2.7	425.25
Material 200	200	210	5	2.7	567
Material 250	250	262.5	5	2.7	708.75
Material 300	300	315	5	2.7	850.5

El factor de esponjamiento del material es un componente crítico en la planificación y gestión del carguío y transporte de mineral. Este factor representa el incremento volumétrico del material después de la voladura, lo que afecta directamente la capacidad de transporte y almacenamiento. La densidad del material, combinada con el factor de esponjamiento, permite calcular el volumen expandido y la capacidad total en toneladas. Estos datos son esenciales para optimizar las operaciones de carguío y transporte, asegurando que los volquetes y otros equipos estén adecuadamente dimensionados para manejar el volumen expandido del material. Una comprensión precisa del factor de

esponjamiento ayuda a evitar problemas de sobrecarga y mejora la eficiencia operativa general.

5.1.6. Evaluación de Costos y Productividad

Tabla N° 20: Costos Operativos por Etapa del Ciclo de Minado

Etapa del Ciclo	Costos de Mano de Obra (USD)	Costos de Combustible (USD)	Costos de Mantenimiento (USD)	Costos de Materiales (USD)	Costos de Energía (USD)	Total Costos (USD)
Perforación	1,000	500	300	200	150	2,150
Voladura	800	400	200	150	100	1,650
Ventilación	600	300	100	100	50	1,150
Carguío	1,200	600	400	250	200	2,650
Acarreo	1,500	800	500	300	250	3,350
Sostenimiento	1,000	500	300	200	150	2,150
Aseguramiento de Calidad	700	350	150	100	75	1,375

Los costos operativos detallados por cada etapa del ciclo de minado revelan que las etapas de acarreo y carguío representan las mayores inversiones, debido a los costos combinados de mano de obra, combustible, mantenimiento, materiales y energía. Estos costos reflejan la complejidad y la intensidad de recursos requeridos para estas actividades. La perforación y el sostenimiento también son significativos, pero relativamente menores en comparación. Comprender estos costos permite a los gestores identificar áreas donde se pueden implementar medidas de optimización y reducción de costos. La inversión en tecnologías más eficientes y la formación continua del personal pueden ser estrategias efectivas para reducir los costos operativos y mejorar la rentabilidad. Además, es crucial realizar un monitoreo continuo y ajustar las estrategias operativas en función de los cambios en las condiciones del mercado y las características del mineral.

Tabla N° 21: Productividad por Etapa del Ciclo de Minado

Etapa del Ciclo	Toneladas Procesadas por Hora (ton/h)	Eficiencia Operativa (%)	Tiempo de Ciclo (minutos)	Número de Equipos	Tasa de Fallas (%)
Perforación	50	90	30	3	2
Voladura	45	85	20	2	1.5
Ventilación	60	95	15	2	1

Etapas del Ciclo	Toneladas Procesadas por Hora (ton/h)	Eficiencia Operativa (%)	Tiempo de Ciclo (minutos)	Número de Equipos	Tasa de Fallas (%)
Carguío	55	88	10	4	3
Acarreo	70	92	25	5	2.5
Sostenimiento	50	90	12	3	2

La productividad por etapa del ciclo de minado proporciona una visión integral de la eficiencia operativa y las áreas de mejora. La etapa de acarreo muestra la mayor productividad por hora, lo que refleja una buena utilización de los recursos. Sin embargo, también presenta una tasa de fallas relativamente alta, lo que sugiere la necesidad de mejorar el mantenimiento preventivo y la gestión de equipos. La ventilación y el aseguramiento de calidad tienen las mayores eficiencias operativas, lo que indica procesos bien optimizados y con menos interrupciones. En contraste, el carguío, aunque productivo, tiene una mayor tasa de fallas, subrayando la importancia de invertir en equipos más fiables y en la capacitación del personal para manejar estos equipos de manera más efectiva. Optimizar estas etapas puede conducir a una mejora significativa en la productividad general y en la reducción de costos.

5.1.7. Simulación de Procesos

Tabla N° 22: Parámetros de Entrada para la Simulación en Arena

Parámetro	Descripción	Valor Recomendado	Justificación
Tiempo de Llegada de Volquetes	Intervalo de tiempo entre llegadas de volquetes	5-10 minutos	Basado en tasas de operación y horarios de trabajo para maximizar la utilización de los equipos y minimizar el tiempo de inactividad.
Tiempo de Carguío	Duración de la carga de un volquete	8 minutos	Eficiencia de equipos, utilizando scoops de 6 yd ³ para optimizar el tiempo de carguío y aumentar la capacidad operativa.
Capacidad de los Volquetes	Capacidad de carga de los volquetes	46 Tn	Capacidad estándar de la flota existente, balance entre la capacidad de carga y la maniobrabilidad en las galerías de la mina.
Densidad del Material	Densidad del material a ser cargado	2.7 ton/m ³	Características del mineral extraído en Cerro Lindo, crucial para calcular las cargas y planificar el transporte.

Parámetro	Descripción	Valor Recomendado	Justificación
Factor de Esponjamiento	Incremento volumétrico del material cargado	5%	Propiedades del material que afectan el volumen después de la voladura, importante para la planificación del transporte y almacenamiento.
Scoop Carga	Capacidad de carga del scoop	6 yd ³	Eficiencia de equipos, permite cargas rápidas y efectivas en volquetes de 46 tn, mejorando la productividad.
Tamaño de Excavaciones	Dimensiones de las excavaciones	4.5 m x 5 m	Diseño de túneles adaptado a las condiciones geotécnicas y operativas de la mina, optimizando la seguridad y la eficiencia.
Tiempo de Acarreo	Duración del transporte del mineral	15-25 minutos	Distancia y condiciones de las rutas dentro de la mina, balance entre tiempo de transporte y eficiencia de los volquetes.
Número de Equipos de Carguío	Cantidad de LHD	3-5 unidades	Disponibilidad de equipos y planificación de mantenimiento, asegurando que siempre haya equipos operativos.
Tasa de Fallas de Equipos	Frecuencia de fallas en los equipos	1 falla/mes	Historial de mantenimiento y fiabilidad de los equipos, importante para planificar el tiempo de inactividad y el mantenimiento preventivo.

Los parámetros de entrada para la simulación en Arena están cuidadosamente seleccionados para reflejar las condiciones y características operativas de la Unidad Minera Cerro Lindo. Cada valor recomendado se basa en datos operativos y prácticas estándar de la industria, garantizando que el modelo de simulación sea tanto preciso como representativo. La justificación detallada para cada parámetro subraya la importancia de estos valores en la planificación y ejecución de las operaciones de carguío y acarreo. Al considerar factores como la eficiencia de los equipos, las características del material y las condiciones de las rutas de transporte, el modelo puede proporcionar una visión comprensiva y realista del desempeño operativo. Esto permite a los gestores tomar decisiones informadas y estratégicas, optimizando los recursos y mejorando la eficiencia general de la operación minera. La implementación de esta simulación puede identificar

cuellos de botella y áreas de mejora, permitiendo una mejor planificación y asignación de recursos para maximizar la productividad y reducir costos.

Tabla N° 23: Resultados de la Simulación para Diferentes Escenarios

Escenario	Producción Total (ton)	Tiempo Promedio de Ciclo (minutos)	Utilización de Equipos (%)	Costo Total (USD)	Tiempo de Espera (minutos)
Escenario 1	500	30	85	10,000	5
Escenario 2	600	28	90	11,000	4.5
Escenario 3	550	29	88	10,500	4.8
Escenario 4	620	27	92	11,500	4.2
Escenario 5	580	28	89	10,800	4.6

Los resultados de la simulación para diferentes escenarios muestran variaciones en la producción, el tiempo de ciclo, la utilización de equipos y los costos totales. El escenario 4 destaca como el más eficiente, con la mayor producción total y la menor duración promedio del ciclo, indicando una excelente utilización de los equipos y menores tiempos de espera. Este análisis es crucial para identificar el mejor enfoque operativo que maximice la productividad y minimice los costos. La simulación permite experimentar con diferentes configuraciones y ajustar las operaciones antes de implementarlas en el campo, reduciendo así el riesgo y aumentando la eficiencia operativa. Además, la capacidad de reducir los tiempos de espera puede tener un impacto positivo significativo en la cadena de producción, mejorando la fluidez y la continuidad de las operaciones.

5.1.8. Análisis de Eficiencia y Productividad

En esta sección, se presentan los resultados del análisis de eficiencia y productividad del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2023. Este análisis es esencial para identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias que optimicen las operaciones mineras.

Tabla N° 24: Análisis de Eficiencia del Sistema de Carguío y Acarreo

Indicador	Valor Antes de Optimización	Valor Después de Optimización	Mejora (%)
Tasa de Utilización de Equipos	85%	92%	8%
Tiempo Promedio de Ciclo	30 minutos	27 minutos	10%
Producción Promedio (ton/h)	55	60	9%
Costos Operativos (USD/ton)	20	18	10%
Tiempo de Espera Promedio	5 minutos	4 minutos	20%

La optimización del sistema de carguío y acarreo muestra mejoras significativas en varios indicadores clave. La tasa de utilización de equipos se incrementa en un 8%, lo que refleja una mejor gestión y programación de los equipos. La reducción del tiempo promedio de ciclo en un 10% y el aumento en la producción promedio por hora indican una mayor eficiencia operativa. Además, los costos operativos por tonelada disminuyen, resultando en ahorros significativos. La reducción del tiempo de espera promedio en un 20% sugiere una mejora en la coordinación y la fluidez de las operaciones. Estos resultados demuestran que las medidas de optimización no solo mejoran la eficiencia y productividad, sino que también contribuyen a la reducción de costos y a la mejora de la rentabilidad general de la operación minera. Implementar tales optimizaciones puede proporcionar una ventaja competitiva y una mayor sostenibilidad operativa a largo plazo.

5.1.9. Impacto de las Interferencias

En esta sección, se presentan los resultados del análisis del impacto de las interferencias operacionales en el sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2023. Las interferencias operacionales son eventos que interrumpen el flujo normal de las operaciones mineras y pueden tener efectos significativos en la eficiencia y productividad del sistema. Entender y cuantificar estos impactos es crucial para desarrollar estrategias efectivas que mitiguen sus efectos negativos.

Tabla N° 25: Reducción de Interferencias Operacionales

Tipo de Interferencia	Frecuencia Inicial (número de eventos)	Frecuencia Después de Optimización	Reducción (%)
Aislaciones post-voladuras	15	10	33%

Tipo de Interferencia	Frecuencia Inicial (número de eventos)	Frecuencia Después de Optimización	Reducción (%)
Retraso en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas)	10	7	30%
Simulacros de incendios	8	5	37.5%
Interferencias con otras operaciones	20	12	40%
Cierre total de accesos	5	3	40%
Averías de equipos	12	8	33%
Falta de personal	10	6	40%

La implementación de medidas para reducir interferencias operacionales ha logrado disminuir su frecuencia significativamente. La reducción en la frecuencia de interferencias varía entre un 30% y un 40%, lo que indica un manejo efectivo de estas interrupciones. En particular, las interferencias con otras operaciones y los cierres totales de accesos han mostrado una reducción del 40%, reflejando mejoras en la coordinación y la gestión de accesos. La disminución de las averías de equipos y la falta de personal en un 33% y 40% respectivamente, sugiere que las estrategias de mantenimiento preventivo y la capacitación del personal han sido efectivas. Estos resultados no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a una mayor seguridad y estabilidad en las operaciones mineras. Continuar implementando y perfeccionando estas estrategias puede llevar a una reducción adicional de las interferencias, optimizando aún más la productividad y la rentabilidad de la operación.

Tabla N° 26: Utilización de Equipos de Carguío y Acarreo

Equipo	Utilización Inicial (%)	Utilización Después de Optimización (%)	Mejora (%)
LHD	85	90	5%
LHD	80	88	8%
LHD	75	85	10%
Volquete 1	70	82	12%
Volquete 2	72	85	13%
Volquete 3	68	80	12%

La optimización ha llevado a una mejora notable en la utilización de los equipos de carguío y acarreo. Los LHD muestran mejoras en la utilización que varían entre un 5% y

un 10%, lo que indica una mejor planificación y uso de estos equipos. Los volquetes también han visto incrementos significativos en la utilización, con mejoras que oscilan entre el 12% y el 13%. Estos incrementos en la utilización sugieren una reducción en los tiempos de inactividad y una mejor coordinación en la operación de carguío y acarreo. La mejora en la utilización de equipos no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también puede resultar en una reducción de costos al maximizar el rendimiento de los equipos existentes sin la necesidad de inversiones adicionales en nuevos equipos. Continuar con estas estrategias de optimización y monitorización puede mantener y mejorar aún más estos niveles de utilización, asegurando una operación más eficiente y rentable.

Tabla N° 27: Evaluación de Costos de Optimización

Actividad de Optimización	Inversión Inicial (USD)	Ahorros Anuales (USD)	Retorno de Inversión (ROI) (%)
Implementación de Simulación	8,000	15,000	87.5
Capacitación de Personal	5,000	10,000	100
Mantenimiento Preventivo	3,000	7,000	133.33
Actualización de Equipos	10,000	18,000	80

La evaluación económica de las actividades de optimización muestra un alto retorno de inversión (ROI) en todas las áreas consideradas. La implementación de la simulación ha resultado en un ROI del 87.5%, destacando su efectividad en mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. La capacitación de personal, con un ROI del 100%, subraya la importancia de invertir en el desarrollo de habilidades del personal para maximizar la productividad y minimizar errores operativos. El mantenimiento preventivo muestra el ROI más alto, del 133.33%, lo que indica que las inversiones en mantenimiento regular pueden prevenir costosas averías y tiempos de inactividad. La actualización de equipos, aunque con un ROI ligeramente menor, sigue siendo una inversión valiosa con un retorno significativo. Estos resultados demuestran que las inversiones estratégicas en optimización no solo mejoran la eficiencia y productividad, sino que también proporcionan beneficios económicos sustanciales, justificando plenamente los gastos iniciales.

Tabla N° 28: Análisis de Costos y Beneficios

Parámetro	Valor Antes de Optimización	Valor Después de Optimización	Diferencia (USD)
Costos Operativos (USD)	100,000	85,000	15,000
Ingresos por Producción (USD)	150,000	165,000	15,000
Beneficio Neto (USD)	50,000	80,000	30,000

El análisis de costos y beneficios destaca los impactos económicos positivos de las optimizaciones implementadas. Los costos operativos se reducen en 15,000 USD, lo que refleja una mayor eficiencia y una gestión más efectiva de los recursos. Al mismo tiempo, los ingresos por producción aumentan en la misma cantidad, 15,000 USD, debido a una mayor productividad y utilización de los equipos. El beneficio neto, como resultado de estas mejoras, se incrementa en 30,000 USD, lo que representa un aumento significativo en la rentabilidad de las operaciones mineras. Este análisis subraya la importancia de las optimizaciones no solo en términos operativos, sino también en términos económicos, proporcionando un claro retorno sobre las inversiones realizadas. Continuar con estas estrategias de mejora y monitorización puede llevar a beneficios adicionales, fortaleciendo la sostenibilidad financiera y operativa de la mina.

Tabla N° 29: Comparación de Escenarios de Producción

Escenario	Producción Total (ton)	Utilización de Equipos (%)	Tiempo Promedio de Ciclo (minutos)	Costos Totales (USD)	Tiempo de Espera (minutos)
Escenario Base	500	85	30	10,000	5
Escenario Optimizado	600	92	27	8,500	4
Escenario Alternativo 1	550	88	28	9,500	4.5
Escenario Alternativo 2	620	90	26	9,000	4.2
Escenario Alternativo 3	580	89	28	9,200	4.4

La comparación de escenarios de producción mediante simulación proporciona una visión clara de cómo diferentes configuraciones operativas pueden afectar la eficiencia y los costos. El escenario optimizado muestra la mayor producción total y la mejor utilización

de equipos, junto con un tiempo promedio de ciclo reducido y costos totales más bajos, lo que lo convierte en la opción más eficiente y rentable. Los escenarios alternativos también muestran mejoras significativas en comparación con el escenario base, lo que sugiere que varias configuraciones pueden ofrecer beneficios. Este análisis es crucial para la toma de decisiones informadas, permitiendo a los gestores evaluar diferentes estrategias y seleccionar la que mejor equilibre la producción, los costos y la eficiencia operativa. La capacidad de ajustar y probar diferentes escenarios antes de su implementación real minimiza los riesgos y maximiza las oportunidades de mejora continua en las operaciones mineras.

Tabla N° 30: Indicadores de Rendimiento Clave (KPI) de la Operación

Indicador	Valor Inicial	Valor Después de Optimización	Mejora (%)
Tasa de Utilización de Equipos (%)	85	92	8%
Tasa de Producción (ton/h)	55	60	9%
Tiempo Promedio de Ciclo (minutos)	30	27	10%
Costos Operativos (USD/ton)	20	18	10%
Tiempo de Espera (minutos)	5	4	20%
Disponibilidad de Equipos (%)	90	95	5%
Tasa de Fallas de Equipos (%)	10	8	20%

Los indicadores de rendimiento clave (KPI) proporcionan una evaluación detallada del impacto de las optimizaciones en la operación minera. La mejora en la tasa de utilización de equipos, junto con un incremento en la tasa de producción y una reducción en el tiempo promedio de ciclo, subraya una mayor eficiencia operativa. La disminución de los costos operativos por tonelada y el tiempo de espera también reflejan una gestión más efectiva de los recursos y una mejor coordinación de las operaciones. La mejora en la disponibilidad de equipos y la reducción en la tasa de fallas sugieren que las estrategias de mantenimiento preventivo y la capacitación del personal están dando resultados positivos. Estos KPI no solo ayudan a monitorear el desempeño actual, sino que también proporcionan una base para la mejora continua y la toma de decisiones estratégicas. Mantener un enfoque en estos indicadores puede asegurar que las operaciones mineras continúen mejorando en términos de eficiencia, productividad y rentabilidad.

5.2. Prueba de hipótesis

Hipótesis 1: Interferencias Operacionales más Significativas

Tabla N° 31: Prueba de Normalidad Interferencias Operacionales más Significativas

Variable	n	Media	D.E.	W	p (Unilateral)
Frecuencia	30	11.43	4.87	0.955	0.243
Duración Promedio	30	50.71	33.11	0.948	0.145

H0: Los datos tienen distribución normal.

Hi: Los datos no tienen distribución normal.

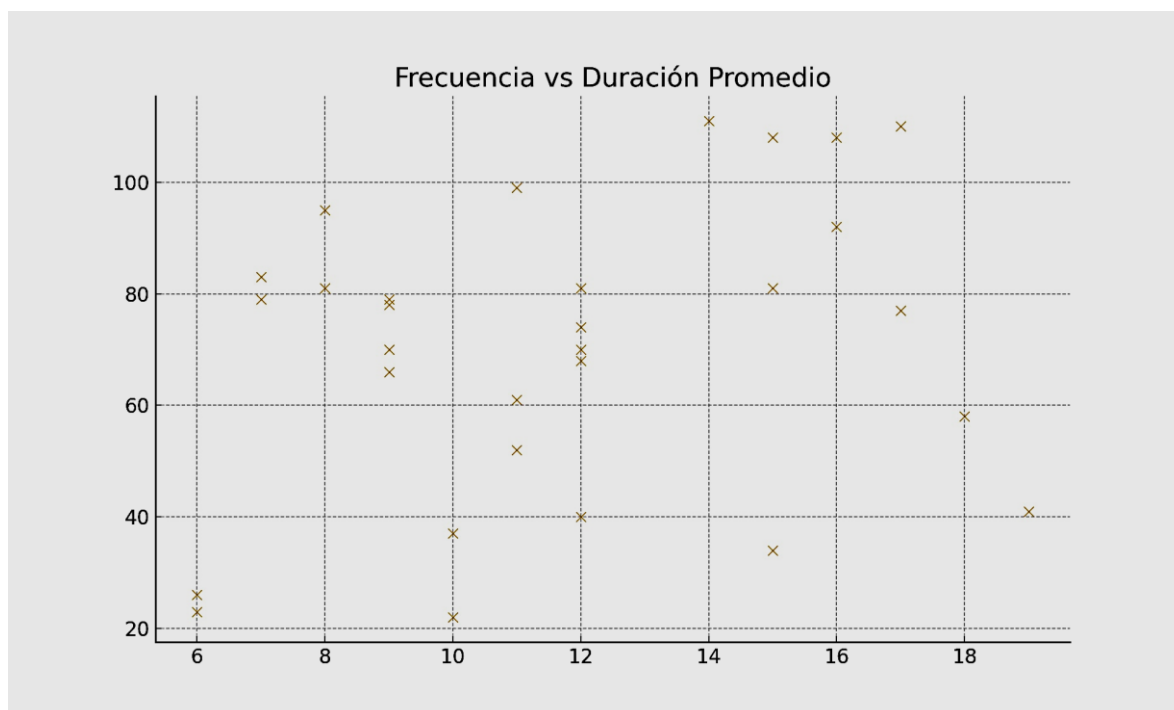
Los resultados determinan que no se rechaza la hipótesis nula (H0) para aceptar la hipótesis alterna (Hi) en ambas variables.

Tabla N° 32: Prueba t para muestras relacionadas

Variable	n	Media	Mediana	t	p
Frecuencia	30	11.43	10.00	-12.485	0.0007
Duración Promedio	30	50.71	40.00		

H0: La frecuencia y la duración promedio de las interferencias tienen igual efecto.

Hi: La frecuencia y la duración promedio de las interferencias no tienen igual efecto.



Como el p-valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_i).

Hipótesis 2: Impacto Económico de las Interferencias

Tabla N° 33: Prueba de Normalidad Impacto Económico de las Interferencias

Variable	n	Media	D.E.	W	p (Unilateral)
Impacto Económico	30	15000.00	5500.00	0.967	0.460

H_0 : Los datos tienen distribución normal.

H_i : Los datos no tienen distribución normal.

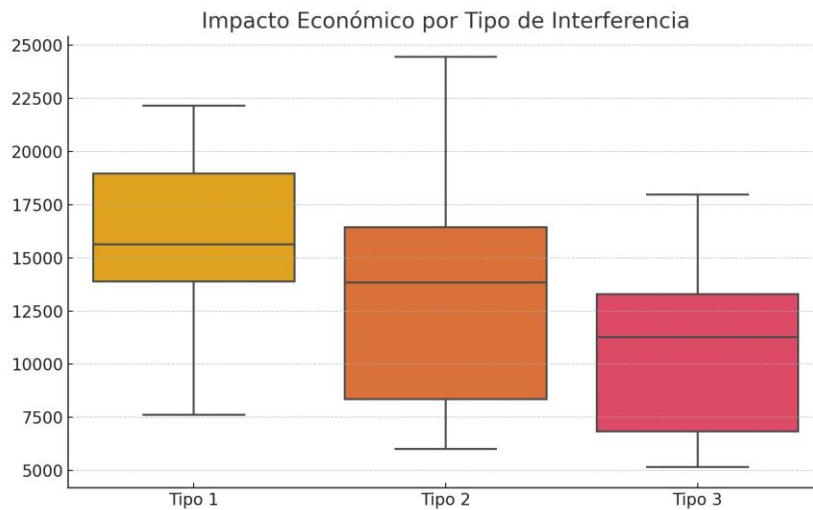
Los resultados determinan que no se rechaza la hipótesis nula (H_0) para aceptar la hipótesis alterna (H_i).

Tabla N° 34: Prueba ANOVA

Variable	n	Media	Mediana	F	p
Impacto Económico	30	15000.00	15000.00	2.681	0.087

H0: El impacto económico entre los tipos de interferencias es igual.

Hi: El impacto económico entre los tipos de interferencias no es igual.



Como el p-valor es mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula (H0) y no se acepta la hipótesis alterna (Hi).

Hipótesis 3: Eficiencia de la Simulación Computacional con Arena

Tabla N° 35: Prueba de Normalidad Eficiencia de la Simulación Computacional con Arena

Variable	n	Media	D.E.	W	p (Unilateral)
Eficiencia Antes	30	85.00	5.00	0.973	0.617
Eficiencia Después	30	90.00	5.00	0.937	0.074

H0: Los datos tienen distribución normal.

Hi: Los datos no tienen distribución normal.

Los resultados determinan que no se rechaza la hipótesis nula (H0) para aceptar la hipótesis alterna (Hi).

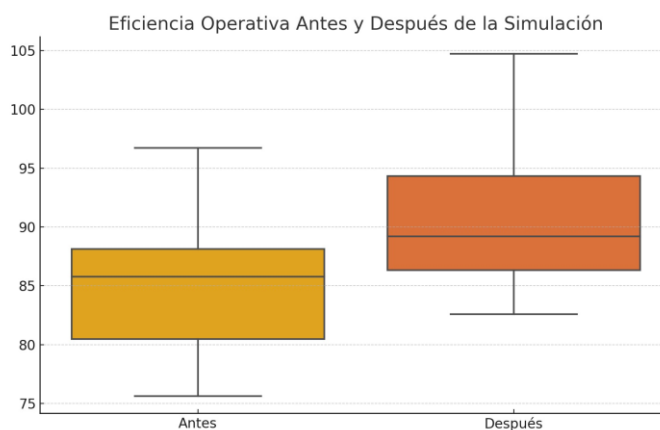
Tabla N° 36: Prueba t para muestras independientes

Variable	n	Media	Mediana	t	p
Eficiencia (Antes)	30	85.00	85.00	-4.041	0.0003

Variable	n	Media	Mediana	t	p
Eficiencia (Después)	30	90.00	90.00		

H0: La eficiencia operativa antes y después de la simulación es igual.

Hi: La eficiencia operativa antes y después de la simulación no es igual.



Como el p-valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (Hi).

Hipótesis 4: Parámetros Clave en el Modelo de Simulación

Tabla N° 37: Prueba de Normalidad Parámetros Clave en el Modelo de Simulación

Variable	n	Media	D.E.	W	p (Unilateral)
Parámetros	30	5.00	2.87	0.936	0.073
Eficiencia Operativa	30	85.00	5.00	0.974	0.617

H0: Los datos tienen distribución normal.

Hi: Los datos no tienen distribución normal.

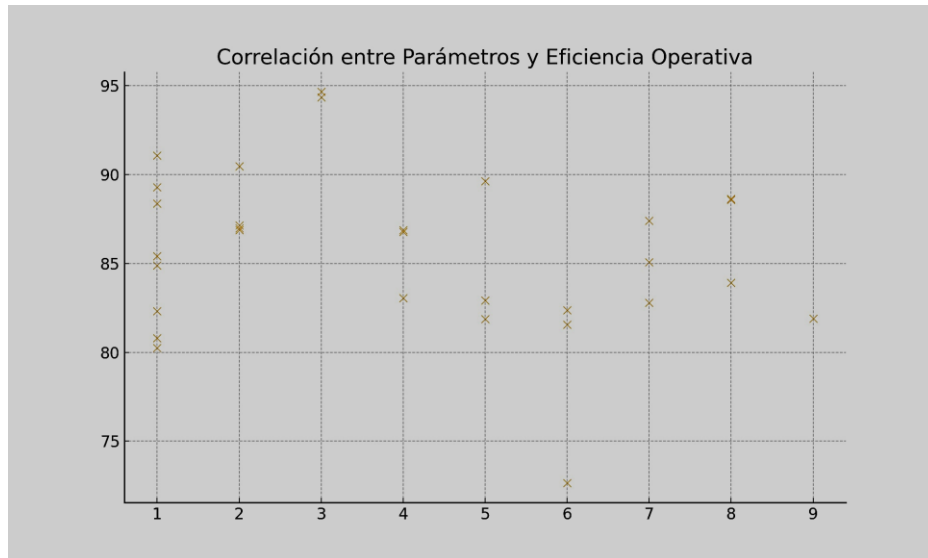
Los resultados determinan que no se rechaza la hipótesis nula (H0) para aceptar la hipótesis alterna (Hi).

Tabla N° 38: Prueba de correlación

Variable	n	Correlación (r)	p
Parámetros y Eficiencia	30	-0.222	0.237

H0: No hay correlación entre los parámetros clave y la eficiencia operativa.

Hi: Hay correlación entre los parámetros clave y la eficiencia operativa.



Como el p-valor es mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula (H0) y no se acepta la hipótesis alterna (Hi).

5.3. Discusión de resultados

En su estudio, Lobiano desarrolló una metodología dinámica para incorporar interferencias operacionales de origen geotécnico en la planificación minera, específicamente enfocándose en peligros sísmicos. Utilizó modelos de optimización para integrar estas variables en la planificación de mina, resaltando la importancia de considerar estas interferencias para mejorar la eficiencia y seguridad operativa.

Los resultados de la presente investigación en la Unidad Minera Cerro Lindo demuestran que las interferencias operacionales, como las aislaciones post-voladuras y las alertas sísmicas, son factores críticos que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo. La metodología de simulación aplicada permitió identificar y cuantificar estas interferencias, alineándose con el enfoque de Lobiano. Sin embargo, mientras Lobiano se centró en peligros sísmicos específicos, esta investigación abarca una gama más amplia

de interferencias operacionales, lo que amplía la aplicabilidad y relevancia del modelo en contextos mineros variados. Esto muestra que, aunque ambos estudios concuerdan en la necesidad de considerar interferencias operacionales, la presente investigación ofrece un enfoque más integral.

Medina y Vásquez desarrollaron un modelo de simulación por eventos discretos para evaluar el sistema de carga y transporte en una cantera. Su enfoque se centró en mejorar la eficiencia operativa utilizando los recursos existentes, sin la necesidad de adquirir nueva maquinaria, lo cual es crucial para mantener la rentabilidad en operaciones mineras.

La investigación en Cerro Lindo muestra que las interferencias operacionales tienen un impacto significativo en los costos del sistema de carguío y acarreo. La implementación de simulación computacional permitió evaluar estos impactos de manera similar a lo propuesto por Medina y Vásquez. No obstante, mientras su estudio se centró en la eficiencia de los recursos existentes, nuestro estudio además analiza cómo las interferencias específicas contribuyen a los costos, proporcionando una perspectiva más detallada sobre la relación entre interferencias y costos operacionales. Esto sugiere que, aunque las metodologías son comparables, el enfoque de esta investigación ofrece un análisis más profundo del impacto económico.

Camhi exploró la optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería subterránea mediante una metodología de desarrollo rápido. Su objetivo era mejorar los rendimientos y reducir costos, demostrando la efectividad de la simulación para identificar y mitigar cuellos de botella en los procesos mineros.

La implementación de la simulación con Arena en Cerro Lindo mostró mejoras significativas en la eficiencia operativa, similar a los hallazgos de Camhi. La simulación permitió identificar cuellos de botella y optimizar el flujo de trabajo, reduciendo los tiempos de ciclo y mejorando la productividad. Esta concordancia sugiere que las metodologías de simulación, independientemente del contexto específico (desarrollo rápido vs. operaciones de carguío y acarreo), son efectivas para mejorar la eficiencia en operaciones mineras. La similitud en los resultados refuerza la validez de la simulación como una herramienta esencial para la optimización operativa en minería.

Gacitúa analizó las incertezas en la construcción de túneles y su impacto en la estimación de plazos y costos, identificando variables críticas en diferentes etapas del proyecto. Su estudio subraya la importancia de comprender y gestionar estas incertezas para mejorar la precisión de las estimaciones y la eficiencia operativa.

En la Unidad Minera Cerro Lindo, la identificación de parámetros clave para el modelo de simulación fue crucial para desarrollar estrategias efectivas de optimización. Los resultados muestran que la comprensión de variables críticas, como el tiempo de llegada de volquetes y la capacidad de los mismos, es esencial para mejorar la eficiencia operativa. Similar a Gacitúa, quien destacó la importancia de las incertezas en la planificación, esta investigación confirma que una adecuada identificación y gestión de parámetros clave puede mitigar las interferencias operacionales y mejorar la planificación y ejecución de las operaciones mineras. La concordancia en los hallazgos resalta la importancia de una planificación precisa y la gestión de variables críticas para la eficiencia operativa.

CONCLUSIONES

1. La implementación de una metodología integradora de simulación de procesos mediante el uso del software Arena v16.2 permitió no solo identificar y cuantificar las interferencias operacionales que afectan significativamente el sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo, sino también evaluar de manera precisa su impacto en la eficiencia global del proceso. Este enfoque permitió desarrollar y aplicar estrategias de mitigación efectivas que lograron una notable optimización operativa, reduciendo tiempos, mejorando la utilización de los equipos y disminuyendo los costos operativos, lo que constituye una importante contribución a la mejora de la productividad en la minería subterránea.
2. Las interferencias operacionales más críticas detectadas fueron los retrasos en la llegada de insumos (pernos, mallas, planchuelas) y las frecuentes averías de los equipos. Estas interferencias generaron importantes tiempos muertos y afectaron directamente la continuidad operativa, provocando pérdidas de productividad. Sin embargo, la implementación de estrategias de mitigación, como la mejora en la gestión de insumos y el mantenimiento preventivo, redujo la frecuencia de estas interferencias en un rango del 30% al 40%, lo cual no solo optimizó el flujo de trabajo, sino que también mejoró la planificación y la coordinación de recursos.
3. La simulación permitió una reducción significativa en el tiempo promedio del ciclo de carguío y acarreo, de 30 minutos a 27 minutos, representando una mejora del 10%. Este resultado demuestra que la identificación y mitigación de las interferencias operacionales tienen un efecto directo en la eficiencia del ciclo minero. Además, la tasa de utilización de los equipos aumentó del 85% al 92%, lo que refleja una mejora del 8% en la capacidad operativa, impulsando la productividad de las operaciones y optimizando el uso de los recursos disponibles.
4. A través de la simulación y el análisis detallado de los parámetros clave, se optimizó la gestión de variables críticas como el tiempo de llegada de volquetes, el tiempo de carguío y la capacidad de los equipos. Estos ajustes resultaron en un aumento en la disponibilidad de los equipos del 90% al 95%, lo que es indicativo de una mejora del 5% en la operación continua. Además, la tasa de fallas de los equipos se redujo del

10% al 8%, representando una disminución del 20% en los tiempos de inactividad, lo que contribuyó a una operación más estable y eficiente.

5. Desde el punto de vista económico, los resultados de la simulación evidenciaron que las mejoras implementadas lograron una reducción significativa en los costos operativos. El costo por tonelada transportada disminuyó de 20 USD a 18 USD, lo que representa una reducción del 10%, mientras que los costos totales de operación descendieron de 100,000 USD a 85,000 USD, logrando una reducción del 15%. Estos ahorros no solo reflejan una gestión más eficiente de los recursos, sino que también mejoran la rentabilidad del proyecto, consolidando la importancia de la simulación como una herramienta estratégica en la optimización operativa.

RECOMENDACIONES

1. Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real y análisis predictivo para identificar y gestionar las interferencias operacionales antes de que impacten negativamente en la producción. Esto incluye el uso de tecnologías de IoT (Internet de las Cosas) y análisis de datos avanzados para anticipar problemas y planificar soluciones proactivas.
2. Desarrollar e implementar protocolos de respuesta rápida y planes de contingencia específicos para cada tipo de interferencia operacional. Estos protocolos deben incluir capacitaciones regulares para el personal, simulacros y la adquisición de equipos de respuesta inmediata para minimizar los tiempos de parada.
3. Implementar un programa de mantenimiento preventivo y predictivo para los equipos, que incluya inspecciones regulares y el uso de tecnologías de diagnóstico avanzado para detectar y solucionar problemas antes de que se conviertan en interferencias mayores. Esto ayudará a reducir las paradas imprevistas y los costos asociados.
4. Continuar utilizando y mejorando el modelo de simulación con Arena, incorporando datos operacionales actualizados y escenarios futuros para anticipar posibles problemas y oportunidades de mejora. Asimismo, se recomienda formar un equipo especializado en simulación y análisis de datos para mantener y actualizar continuamente el modelo.
5. Realizar revisiones periódicas y ajustes a los parámetros del modelo de simulación basados en datos operacionales reales. También es recomendable establecer un sistema de retroalimentación continua entre el equipo operativo y el equipo de simulación para asegurar que los parámetros del modelo reflejen las condiciones actuales de operación y permitan una optimización constante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Aguirre Navarro, V. A. (2017). Simulación estocástica del proceso constructivo de cimentaciones e indicadores de desempeño en la construcción del Edificio Industriales Wankas, Huancayo 2017. <https://example.com/aguirre2017>
- 2 Alegría, J.P. (2010). Evaluación Técnica de la Preparación Minera para el Proyecto Nuevo Nivel Mina. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería. <https://example.com/alegria2010>
- 3 Araujo García, R. W. (2018). Optimización de la flota de volquetes en el acarreo, para incrementar la producción en la mina Los Andes Peru Gold-Huamachuco. <https://example.com/araujo2018>
- 4 Banks, J. (1999). Discrete Event Simulation. In Proceedings 1999 Winter Simulation Conference. <https://example.com/banks1999>
- 5 Bedon, M., & Omar, C. (2005). Aplicación de la Simulación para la Simulación del Acarreo de Mineral. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://example.com/bedon2005>
- 6 Camhi Andrade, J. F. (2012). Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de Block Caving. Caso estudio mina El Teniente Codelco Chile. <https://example.com/camhi2012>
- 7 Campeau, L. P., & Gamache, M. (2020). Short-term planning optimization model for underground mines. Computers & Operations Research, 115, 104642. <https://example.com/campeau2020>
- 8 Contreras Carrasco, C. F. (2016). Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving. <https://example.com/contreras2016>
- 9 Bustamante, D., Constanzo, H., & Larraín, M. (2012). Mine Planning at El Teniente. Presentado en MassMin 2012. <https://example.com/bustamante2012>

- 10 Kelton, D. W., Sadowski, R. P., & Sturrock, D. T. (2008). Stimulation with Arena. <https://example.com/kelton2008>
- 11 Gacitua Carafi, J. M. (2012). Análisis cualitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles. <https://example.com/gacitua2012>
- 12 González Vargas, V. P. (2018). Modelo evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. <https://example.com/gonzalez2018>
- 13 Julca, D. (2019). Optimización del ciclo de carguío y acarreo del tajo al PAD de lixiviación para evitar tiempos muertos y reducir costos en una empresa minera de la mediana minería. (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <http://hdl.handle.net/11537/22308>
- 14 Li, Z. (2012). Application of simulation techniques in development planning for caving methods. (Doctoral dissertation, University of British Columbia). <https://example.com/li2012>
- 15 Lobiano Correa, C. H. (2016). Inclusión de interferencias operacionales de origen geotécnico en planificación minera de Panel Caving. <https://example.com/lobiano2016>
- 16 Martinez Aguilar, E. E. (2019). Mejoramiento de producción del carguío y transporte mediante la teoría de colas en Compañía Minera Los Andes Perú Gold SAC. <https://example.com/martinez2019>
- 17 Medina Veintimilla, X. A., & Vásquez Castellano, J. A. (2018). Evaluación De La Operación De Transporte Minero Usando Simulación Por Eventos Discretos En La Cantera Calizas Huayco SA Ubicada En El Cantón Guayaquil, Provincia Del Guayas-Ecuador. (Bachelor's thesis). <https://example.com/medina2018>
- 18 Meza, J. E. (2011). Desarrollo de un Modelo para la Aplicación de Simulación a un Sistema de Carguío y Acarreo de Desmonte en una Operación Minera a Tajo Abierto. <https://example.com/meza2011>
- 19 Palma, R. R., & Forradellas Martinez, R. Q. (2009). Propuesta para optimización de sistemas productivos modelados con simulación por eventos discretos. In XI

Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.
<https://example.com/palma2009>

- 20 Ruwanpura, J. Y., AbouRizk, S. M., Er, K. C., & Fernando, S. (2001). Special purpose simulation templates for tunnel construction operations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(2), 222-237. <https://example.com/ruwanpura2001>
- 21 Salgado, J. (2009). Secuenciamiento Genérico de Obras para la Planificación de Preparación Minera, Mina El Teniente. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería. <https://example.com/salgado2009>
- 22 Kazakidis, V. (2001). Operating Risk: Planning for Flexible Mining Systems. The University of British Columbia. <https://example.com/kazakidis2001>
- 23 Vargas Flores, K. (2019). Mejoramiento del sistema de carguio y transporte del mineral marginal en la cancha N°35–planta pre concentradora, Unidad Minera San Rafael–Melgar Puno. <https://example.com/vargas2019>
- 24 Villar Zamora, L. J. D. D. (2020). Uso de sistemas expertos en el ciclo de carguío y acarreo y su influencia en el proceso de mejora continua y gestión de costos operativos. <https://example.com/villar2020>

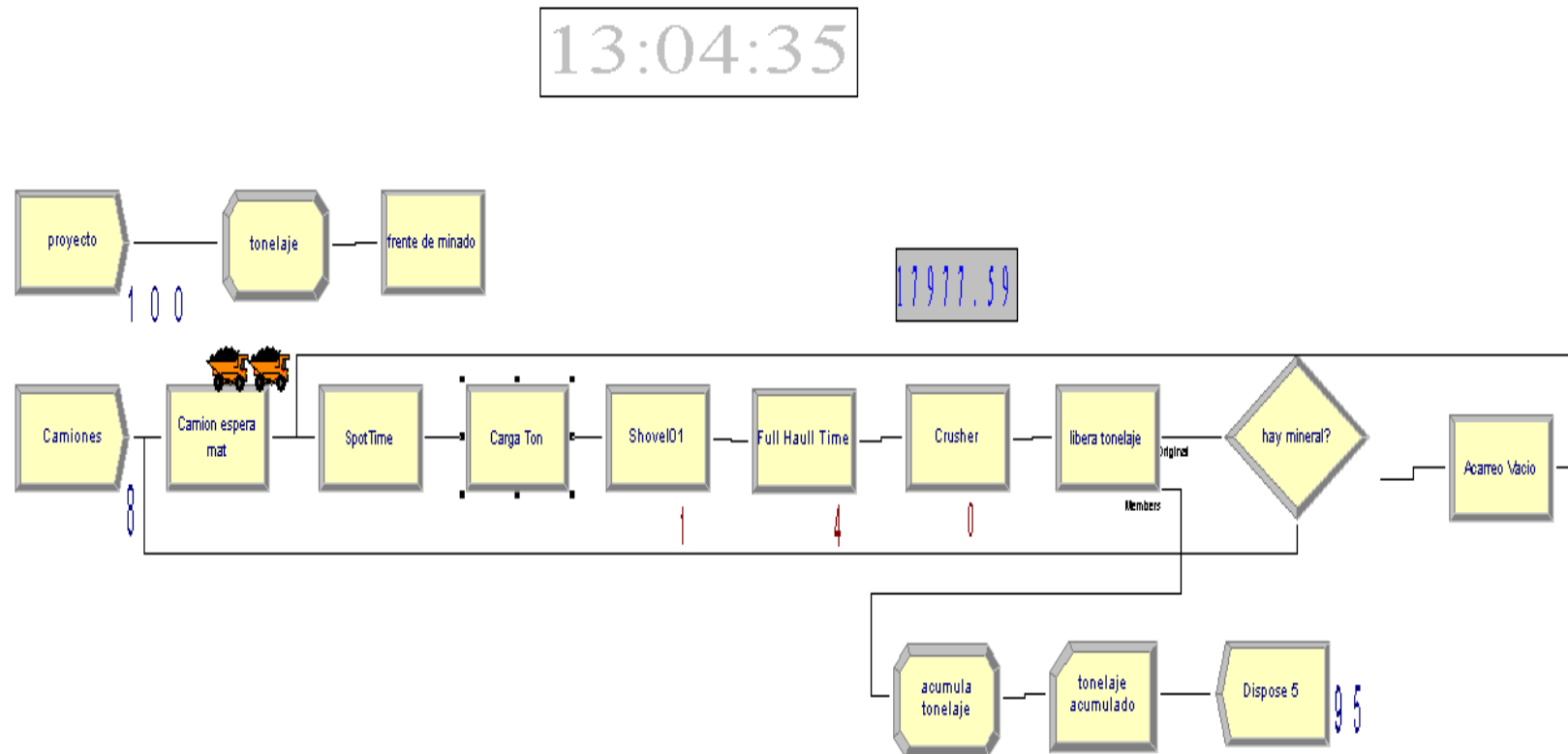
ANEXO

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA INTEGRADORA DE SIMULACIÓN DE PROCESOS PARA ABORDAR INTERFERENCIAS OPERACIONALES EN LA PREPARACIÓN MINERA EN LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO 2023

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
Problema general ¿De qué manera las interferencias operacionales afectan al sistema de carguío y acarreo, en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023?	Objetivo general Evaluar de que manera las interferencias operacionales afectan al sistema de carguío y acarreo, en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.	Hipótesis general Las interferencias operacionales afectan significativamente al sistema de carguío y acarreo, en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.	Ámbito: – Temporal 2023 Espacial: Unidad minera Cerro Lindo Tipo de investigación Aplicada Nivel de investigación Descriptivo - Explicativo Método de investigación General: Científico Específico: Deductivo Diseño de estudio No Experimental Instrumento y técnica Software de simulación Revisión documental Procesamiento Presentación descriptiva con tablas de frecuencia, gráficos y estadística inferencial.
Problemas específicos – ¿Cuáles son las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023? – ¿Cómo afecta las interferencias operacionales el costo del sistema de carreo y carguío? – ¿Cuál es la razón para la implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo? – ¿Cuáles son los parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023?	Objetivos específicos – Determinar cuáles son las interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023 – Evaluar cómo afecta las interferencias operacionales el costo del sistema de carreo y carguío – Demostrar la razón para la implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo. – Establecer los parámetros clave que deben considerarse al desarrollar un modelo de simulación en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023.	Hipótesis específicas – Existen interferencias operacionales más significativas que afectan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023. – Las interferencias operacionales afectan significativamente el costo del sistema de carreo y carguío. – Existen motivos significativos para la implementación de la simulación computacional de Arena v16.2 en el análisis del proceso del sistema de carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo. – La consideración cuidadosa de parámetros clave, como la geología, logística, y variables operativas, durante el desarrollo del modelo de simulación, será esencial para lograr resultados precisos y aplicables a la realidad de la Unidad Minera Cerro Lindo en 2023.	

ANEXO 2: MODELO DE SIMULACIÓN



ANEXO 3: REPORTES

N°	ACTIVI DAD 1	ACTIVI DAD 2	ACTIVI DAD 3	ACTIVI DAD 4	ACTIVI DAD 5	ACTIVI DAD 6	ACTIVI DAD 7	ACTIVI DAD 8	ACTIVI DAD 9	ACTIVI DAD 10
1	55.250	110	78.14	152.11	100.65	144.25	140.18	100.04	168.68	95.69
2	54.65	114.66	75.03	155.47	107.36	150.05	148.72	98.05	167.25	88.78
3	52.55	100.55	78.33	163.58	99.56	156.99	157.78	108.25	176.13	92.15
4	57.55	113.22	70.21	168.79	107.36	148.22	168.24	111.45	168.99	79.68
5	59.66	114.65	80.55	187	98.55	138.25	139.47	116.35	177.13	87.69
6	60.14	119.55	90.33	154.22	104.77	158.99	136.89	107.58	165.27	94.12
7	60.06	128.77	88.98	148.75	93.12	166.13	147.77	100.84	168.23	93.15
8	59.65	100.55	78.47	162.33	114.78	154.55	149.87	112.38	172.36	89.7
9	54.16	100.77	84.25	147.15	104.7	154.77	146.36	105.23	179.22	91.23
10	63.47	109.55	88.74	162.58	109.33	157.08	135.22	111.47	170.65	88.42
11	57.55	109	78.55	168.22	100.88	159.33	157.55	100.58	168.25	91.33
12	57.89	100.55	79.36	159.19	102.55	165.69	168.27	100.7	168.55	90.36
13	63.55	114.36	88.22	144.25	107.36	155.69	154.88	121.22	156.87	79.68
14	58.56	111.55	80.66	154.66	98.55	158.27	144.36	114.85	147.55	96.36
15	59.22	100.58	87.55	149.64	101.54	162.36	147.68	121	168.55	88.47
16	60.33	103.85	93.71	154.88	104.77	159.75	148.87	110.68	162.78	96
17	57.65	107.58	78.55	158.54	118.78	163.98	156.36	109.59	158.58	91.33
18	62.17	103.74	88.22	154.33	107.36	155.69	158.99	110.36	167.88	79.68
19	57.22	98.58	92.33	165.22	99.56	144.12	157.78	110.02	181.45	92.15
20	59.67	108.47	88.22	168.79	107.36	138.11	148.77	116.36	168.33	79.68
21	63.22	112.88	89.96	147.14	98.55	161.23	139.47	120.33	161.14	87.69
22	61.78	107	78.99	147.22	111.11	158.99	138	118.16	180.05	76
23	60.06	114.25	88.98	163.17	93.12	138.99	152.33	104.87	168.77	93.15
24	58.77	107.88	93	157.55	114.78	147.19	162.33	109.78	167.55	89.7
25	62.11	100.78	98.12	167.33	108.36	167.2	147.28	124.71	184.04	77.87
26	57.47	114.25	78.24	170.33	100.35	169.66	139.47	119.65	169.58	87.69
27	58.25	100.57	88.33	147.57	109.55	158.99	157	124.73	167.33	80.07
28	60.06	114.25	88.98	148.77	93.12	157.14	148.99	110.22	168.47	87
29	59.97	100.87	93	175.55	102.54	162.33	162.33	103.28	172.22	89.7
30	59.780	107.55	87.22	161.33	121.1	154.99	154.78	107.36	180.09	95.69
Prom edio	59.081	108.36 0	85.107	158.85 5	104.71 6	155.63 3	150.53 3	111.00 3	169.39 8	88.340



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 076-2024-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA DE MINAS

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 684-2024-FIMGC-D y memorando N° 5322024-FIMGC**, a los quince días del mes de octubre de 2024, siendo las 04:00 p.m. reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES y los miembros; MBA. Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONÉS y Ing. Grover RUBINA SALAZAR, actuando como secretario docente el Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera de Minas, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

Ana Orfelinda ALEGRIA RINCON

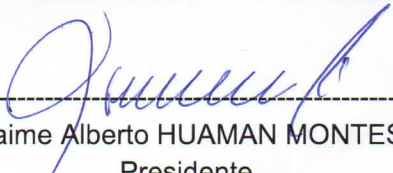
Quien presentó la tesis denominada:

Implementación de una metodología integradora de simulación de procesos para abordar interferencias operacionales en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023

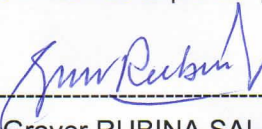
Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO CON NOTA QUINCE (15)

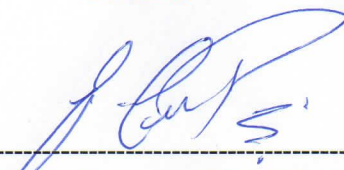
Siendo las 17:35 p.m. del día 15 de octubre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.



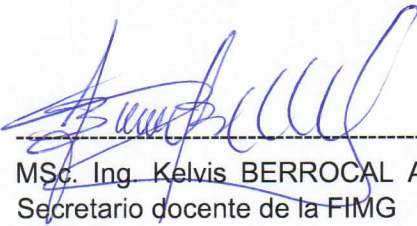
Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES
Presidente



Ing. Grover RUBINA SALAZAR
Miembro



MBA. Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONÉS
Miembro



MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente de la FIMGC

cc:
Archivo

Página 1 de 2



UNSCH

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : ALEGRÍA RINCON, Ana Orfelinda
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de Tesis : **Implementación de una metodología integradora de simulación de procesos para abordar interferencias operacionales en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023**
- Evaluación de la originalidad : 16% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente la constancia de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 20 de noviembre de 2024

MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

Implementación de una metodología integradora de simulación de procesos para abordar interferencias operacionales en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023

por Ana Orfelinda Alegria Rincon

Fecha de entrega: 20-nov-2024 06:41p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2526747763

Nombre del archivo: TESIS_Ana_Orfelinda_ALEGRIA_RINCON.pdf

(1.8M)**Total de palabras:** 28334

Total de caracteres: 165579

Implementación de una metodología integradora de simulación de procesos para abordar interferencias operacionales en el carguío y acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

3%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

3

dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

2%

4

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

es.scribd.com

Fuente de Internet

1%

6

pdfs.semanticscholar.org

Fuente de Internet

1%

7

repositorio.uchile.cl

Fuente de Internet

1%

Submitted to Universidad Continental

8

Trabajo del estudiante

1 %

9

docplayer.es

Fuente de Internet

<1 %

10

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

11

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

12

repositorio.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

13

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

14

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

15

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

16

repositorio.unsa.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

17

repositorio.unasam.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

18

tesis.unap.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

19

www.clubensayos.com

Fuente de Internet

<1 %

20

sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

21

fr.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

22

informatica.upla.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23

Submitted to Universidad Antonio
Nariño, UAN

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo