

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Desarrollo de modelo matemático para el ajuste de
distancias mínimas en equipos con el propósito de
optimizar el proceso de carguío en una mina a tajo
abierto-Arequipa, 2024**

Frank John Neyra Vela

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Arequipa, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Daniel Mayorga Pérez
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 11 de Octubre de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Desarrollo de modelo matemático para el ajuste de distancias mínimas en equipos con el propósito de optimizar el proceso de carguío en una Mina a Tajo Abierto - Arequipa 2024

Autores:

1. Frank John Neyra Vela – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N° de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original

(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

Dedico esta tesis, con todo mi corazón, a Dios y a mi querida familia. Ellos han sido mi pilar constante, brindándome su apoyo incondicional y sabios consejos, los cuales me han acompañado en cada paso de este camino, permitiéndome alcanzar esta meta en mi vida profesional.

Agradezco profundamente a Dios y a mi familia por su amor y apoyo inquebrantables. Gracias a sus palabras de aliento y su presencia constante, pude mantenerme firme y perseverante para lograr esta meta profesional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	2
1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.1.1 Problema General.....	2
1.1.2 Problemas Específicos	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4 HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES	5
1.4.1 Hipótesis General	5
1.4.2 Hipótesis Específicas.....	5
1.4.3 Operacionalización de variables	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
2.2 BASES TEÓRICAS	11
2.2.1 Actividad de la industria minera	11
2.2.2 Etapas del ciclo minero.....	12
2.2.3 Mina a tajo abierto	14
2.2.4 Mina subterránea.....	15
2.2.5 Operaciones mina.....	15
2.2.6 Descripción operación de carguío.....	16
2.2.7 Modelos matemáticos	20
2.2.8 Productividad y calidad de costos	22
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	27
3.1 MÉTODO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	28
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA	28

3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	29
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		35
4.1	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	35
4.1.1	Análisis de aproximaciones críticas entre equipos en el proceso actual de carguío.....	35
4.1.2	Determinación de un modelo matemático para establecer distancia mínima entre los equipos intervinientes en el proceso de carguío.....	40
4.1.3	Evaluación de resultados obtenidos en el contexto de productividad y su impacto económico en el proceso de carguío	51
CONCLUSIONES		59
RECOMENDACIONES.....		60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		61
ANEXOS.....		66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables	5
Tabla 2.	Listado de equipos marcas y capacidades	29
Tabla 3.	Identificación de principales operaciones.....	36
Tabla 4.	Identificación de aproximaciones críticas.....	39
Tabla 5.	Ratio de aproximaciones críticas	40
Tabla 6.	Dimensiones Pala 4100XPC.....	42
Tabla 7.	Dimensiones Camión 797F.....	43
Tabla 8.	Clasificación del riesgo	47
Tabla 9.	Cálculo factor de corrección de la constante Fj.....	49
Tabla 10.	Cálculo de la distancia mínima de aproximación	49
Tabla 11.	Estudio de tiempo de Pala 4100XPC.....	51
Tabla 12.	Productividad de Pala 4100XPC.....	52
Tabla 13.	Ciclo de Pala 4100XPC	53
Tabla 14.	Ciclo de acarreo regular del Camión 797F.....	54
Tabla 15.	Ciclo de acarreo final del Camión 797F	55
Tabla 16.	Productividad del Camión 797F	55
Tabla 17.	Utilidad perdida por detener una Pala 4100XPC.....	56
Tabla 18.	Utilidad perdida por detener un Camión 797F.....	57
Tabla 19.	Lucro cesante por aproximaciones críticas	58
Tabla 20.	Matriz de consistencia:	67
Tabla 21.	Reporte de incidentes 2022	68
Tabla 22.	Formato de Encuesta	70
Tabla 23.	Formato de Lista de Verificación (Cotejo)	71
Tabla 24.	Cuadro de Calificación Lista de Verificación (Cotejo).....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Industria minera – Proceso de carguío, Elaboración propia.....	12
Figura 2.	Etapas del ciclo minero, Elaboración propia.	14
Figura 3.	Tajo abierto Antapaccay. Tomada de “Revista de la Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía”.....	14
Figura 4.	Grandes camiones y palas: Un match que apunta a mayor rendimiento. Tomada de “Revista minería chilena”	17
Figura 5.	Metodología de la investigación.....	27
Figura 6.	Diseño de la investigación	28
Figura 7.	Resultados del cuestionario.....	32
Figura 8.	Evidencia del cuaderno de notas.	33
Figura 9.	Resultado de la lista de verificación (cotejo).	34
Figura 10.	Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H”	35
Figura 11.	Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar”.....	36
Figura 12.	Mapa de calor de puntos ciegos: Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H”.	37
Figura 13.	Mapa de calor de puntos ciegos: Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar”	37
Figura 14.	Puntos ciegos por actividad.	38
Figura 15.	Aproximaciones críticas al año.....	39
Figura 16.	Etapas del modelo matemático.	41
Figura 17.	Dimensiones: Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H”	42
Figura 18.	Dimensiones: Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar”	44
Figura 19.	Sectorización Pala - Camión, Elaboración propia.....	46
Figura 20.	Modelado Pala - Camión, Elaboración propia.	48
Figura 21.	Ciclo de mejora y consistencia, Elaboración propia.....	50
Figura 22.	Ciclo de mejora continua, Tomada de “Círculo de la mejora continua”.....	51
Figura 23.	Ciclo regular del Camión 797F, Elaboración propia.....	53
Figura 24.	Dashboard del cálculo de distancia mínima de aproximación.....	69
Figura 25.	Imágenes de evidencia del trabajo de recolección de data en campo. Elaboración propia.....	73

RESUMEN

La minería es una actividad que normalmente es desarrollada en lugares inhóspitos, siendo su principal objetivo el extraer minerales de valor comercial para procesarlos y, así, poder comercializar un producto final, con el fin de obtener una rentabilidad económica.

Una operación minera cuenta con varias operaciones unitarias importantes, y todas ellas suman para alcanzar los propósitos empresariales, siendo la operación de carguío una de ellas, donde interactúan dos equipos críticos, la Pala Minera y Camión Minero, y las personas que operan estos equipos se exponen a diversos peligros que podrían generar lesiones a la persona y daños a los equipos mineros, lo cual, podría generar impactos negativos a la seguridad, productividad, e imagen empresarial.

La operación unitaria de carguío tiene riesgos operativos que deben ser controlados, y estos controles deben ser establecidos de forma cuantitativa, estandarizando una distancia mínima de aproximación entre el Camión y la Pala Minera para evitar una colisión y en consecuencia un lucro cesante.

Palabras clave: Distancia mínima de aproximación, aproximación crítica, proceso de carguío, modelo matemático, pala minera, camino minero, puntos ciegos, lucro cesante y productividad.

ABSTRACT

Mining is an activity that is normally developed in inhospitable places, being its main objective to extract minerals of commercial value to process them and thus be able to market a final product, in order to obtain an economic profitability.

A mining operation has several important unit operations, and all of them add up to achieve business purposes, the loading operation being one of them, where two critical pieces of equipment interact, the Mining Shovel and the Mining Truck, and the people who operate this equipment are exposed to various dangers that could cause injuries to the person and damage to the mining equipment, which could generate negative impacts on safety, productivity, and business image.

The loading activity has operational risks that must be controlled, and these controls must be established quantitatively, standardising a minimum approach distance between the truck and the mining shovel to avoid a collision and consequently a loss of profit.

Keywords: Minimum approach distance, critical approach, loading process, mathematical model, mining shovel, mining truck, blind spots, lost profits and productivity.

INTRODUCCIÓN

En el sector minero se tiene como objetivo de negocio extraer y producir minerales de interés, ya que esta industria representa el 10 % del PBI nacional, por tal razón, es importante asegurar la mejor disponibilidad en los equipos mineros que están afines con las tareas de perforación, voladura, carguío y acarreo, con el fin de lograr los objetivos planteados por una empresa minera.

Sin embargo, en la minería se tienen varias condiciones que podrían afectar económicamente al desarrollo de la operación minera, como, por ejemplo, durante la explotación se presentan caída de rocas, terrenos accidentados o inestables, rampas o vías reducidas, lluvias constantes, colisión entre equipos, entre otros, haciendo que los equipos móviles mineros sufran daños y, como consecuencia demoras en el proceso, generando un impacto económico negativo para la empresa.

El presente trabajo tiene como propósito desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima que debe tener un camión al acercarse a una pala minera, durante la operación unitaria de carguío, con la finalidad de reducir posibles daños y por consecuencia demoras que podrían generar impactos negativos al proceso productivo minero.

El modelo matemático, tiene que diferenciar las zonas de riesgo de acuerdo con el radio de giro de la pala minera, estableciendo parámetros que permitan calcular el desplazamiento y ubicación que necesita el camión para prevenir una posible colisión.

Es importante indicar que el principal interés del presente trabajo, es proponer un modelo matemático en base a una función lineal, para advertir el riesgo de colisión de un camión contra una pala minera, y de esta forma, se puedan reducir y/o eliminar condiciones de riesgo que pondrían comprometer de forma negativa la seguridad de las personas, la integridad estructural de los equipos, y finalmente el aspecto económico que se tendría por daños y demoras en los equipos y en el proceso.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, el incremento de necesidades de materias primas para el desarrollo de tecnología, hace necesario que las actividades mineras tengan un rol fundamental en el desarrollo del país.

El proceso de mina desarrolla operaciones unitarias críticas para obtener una máxima recuperación en la extracción del mineral deseado, como son los procesos de perforación, voladura, carguío, acarreo, entre otros.

La operación unitaria de interés para la actual investigación es la etapa de carguío, donde la productividad de equipos mineros son un factor clave para sostener el logro de los planes de producción; sin embargo, no siempre se logra tener los resultados deseados, y esto impacta directamente a la operación minera, afectando a su plan de minado y como consecuencia final, generando un lucro cesante y pérdida en las utilidades.

Entre factores internos, los riesgos operacionales están presentes durante la operación de equipos mineros, como una colisión que puede generar daños desde una clasificación menor hasta una catastrófica, generando pérdidas que afectarían directamente al negocio minero.

Como estos tipos de incidentes en los equipos mineros son la razón de preocupación en cualquier unidad minera es importante analizar las oportunidades de mejora que se puedan presentar en este proceso

1.1.1 Problema General

¿Cómo se podrá desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos, de manera que se optimice el proceso de carguío en una mina a tajo abierto?

1.1.2 Problemas Específicos

- ¿Se podrá analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso de carguío?
- ¿Se podrá determinar un modelo matemático para establecer la distancia mínima de equipos en el proceso de carguío?
- ¿Cuáles serían las mejoras al aplicar el modelo matemático en la determinación de distancia mínima de equipos en el proceso de carguío?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos con el propósito de optimizar el proceso de carguío en una mina a tajo abierto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso actual de carguío.
- Determinar un modelo matemático que establezca la distancia mínima de aproximación entre equipos en el proceso de carguío.
- Evaluar los resultados en el contexto de la productividad y su impacto económico en el proceso de carguío.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La justificación e importancia de este trabajo radica en declarar las razones e importancia del desarrollo del proyecto de investigación, la cual se puede definir en:

- **Justificación en seguridad**

Una de las justificaciones más importantes está asociada a la seguridad de los operadores; es decir, al determinar las distancias mínimas bajo un protocolo establecido, se permitirá reducir los incidentes que se podrían generar en esta operación unitaria. Debido a una perspectiva en prevención de accidentes, el riesgo de colisión entre dos equipos mineros como el camión y la pala, tienen un gran potencial de generar desde lesiones graves hasta fatales. En caso se generará alguno de estos eventos, definitivamente el impacto de la operación minera sería negativo, generando multas, indemnizaciones, mala imagen empresarial y hasta el punto de cerrar la operación minera, por tal razón, al implementar y estandarizar las distancias mínimas de

aproximación, también se está priorizando la seguridad de los operadores, asegurando una operación segura de carguío.

- **Justificación económica**

La información económica es una de las más significativas para el desarrollo de esta investigación, entendiendo que el aspecto económico determina la rentabilidad y éxito de un proyecto minero. Es realmente importante considerar que los procesos y objetivos de una organización están orientados en generar beneficios económicos, es decir, rentabilidad; pero cuando se generan eventos fortuitos, es decir situaciones que generan costos o amenazas desde un enfoque financiero, la utilidad del proyecto minero se vería afectada y, como consecuencia, la rentabilidad sufriría un impacto negativo. El determinar una mejora en los equipos de carguío nos permitirá incrementar la productividad y, en consecuencia, generar mayores ingresos.

- **Justificación operacional**

En el proceso operativo, se ha identificado que no se ha establecido una distancia mínima de aproximación entre un camión minero con una pala, para realizar la operación de carguío. Al implementar un modelo matemático, nos asegurará mantener las distancias adecuadas para este proceso operativo y así reducir el riesgo operacional que podría conllevar impactos negativos a la operación minera.

- **Justificación metodológica**

Con la presente investigación se tendrá un beneficio metodológico, puesto que se generaría una línea base de investigación o una metodología para poder determinar distancias mínimas en cualquier operación minera. También se desea contribuir en incentivar el desarrollo de modelos matemáticos para establecer distancias mínimas de aproximación entre equipos mineros y, así, estandarizar parámetros que permitan asegurar de forma objetiva y segura una operación minera de tajo abierto.

- **Importancia de la investigación**

El interés de la investigación es poder contribuir a utilizar un modelo matemático en la predicción y determinación de parámetros aplicables a los procesos operacionales, como es el proceso de carguío, y de esta forma, al proponer una fórmula matemática, permitirá estandarizar cuanto es la distancia mínima que un equipo de acarreo podrá aproximarse a una pala minera para que pueda descargar el mineral sobre la tolva de forma segura, teniendo como objetivo clave la productividad de equipos y la reducción de incidencias que podrían generar un lucro cesante.

1.4 HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

1.4.1 Hipótesis General

Se puede desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos que permita optimizar el proceso de carguío en una mina a tajo abierto.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- Se puede analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso de carguío.
- Con un modelo matemático se podrá determinar la distancia mínima de equipos en el proceso de carguío.
- Los resultados mejorarán la productividad de los equipos y evitarán un impacto económico negativo en el proceso de carguío.

1.4.3 Operacionalización de variables

En este proceso de operacionalización de variables, es de mucha importancia identificar correctamente las variables de investigación. La primera variable es la independiente, caracterizada por ser la causa del tema de estudio y la variable dependiente se caracteriza por ser el resultado.

A continuación, se detallarán las dimensiones e indicadores para cada variable:

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Dimensión	Indicadores
Independiente	Distancia de aproximación entre equipos en el proceso de carguío.	Movimientos de giro de equipo de carguío.	• Radio de operación de equipo de carguío (metros).
		Movimientos de posicionamiento de equipo de acarreo.	• Distancia de aproximación de equipos de acarreo (metros).
Dependiente	Productividad de equipos en el proceso de carguío.	Tonelaje. Lucro cesante.	• Tonelaje de carguío por turno (TM/turno). • Costo dólares por tonelada (\$/TM).

Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para el presente estudio, se han consultado diferentes informes de investigación en el ámbito nacional e internacional, considerando la significancia y antigüedad, siendo los siguientes:

Antecedentes Internacionales

- En la tesis titulada “Diseño y desarrollo de un sistema anticolidión con sensores de proximidad sin contacto”, tuvo como objetivo principal desarrollar un sistema de anticolidión para un robot de asistencia personal, el cual realiza movimientos en espacios reducidos. Realizando un análisis de diversos modelos de sensores de aproximación sin contacto. Luego, un análisis de diversos sistemas de anticolidión que ya existen, para evaluar alternativas de diseño con el fin de obtener un sistema que previene colisiones, que permitan al operador maniobrar los objetos deseados sin generar daños a otros objetos adyacentes o cercanos en el entorno. Finalmente, implementar un sistema de anticolidión que debe localizar objetos que estén ubicados en el entorno, donde maniobrá en un escenario de riesgo de choque y debe remitir en tiempo real la data para lograr frenar el desplazamiento del robot. Como resultado, se desarrolló un diseño y se implementó un sistema definitivo que permitió al robot detectar objetos a una distancia de seguridad de 20 cm (1). Este trabajo contribuye a la presente investigación en la identificación de criterios en la evaluación de la distancia de seguridad para el modelo matemático a realizar.
- En el artículo científico titulado “Sistemas de anticolidión para la industria minera”, tuvo como objetivo principal determinar un sistema que evite y alerte de peligros y riesgo de colisión en el sector minero utilizando programas

especiales. Para ello se realizó en primer lugar, el análisis de los requisitos del sistema que se deseaba implementar para el programa especializado. En segundo lugar, establecer propuestas basándose en los requisitos, finalmente, evidenciar con una propuesta que sea viable. Como resultado, lograron desarrollar un sistema que permitía a los operadores mineros identificar objetos peligrosos y evitar tener algún tipo de daños o accidentes (2). Este trabajo contribuye a evaluar la metodología de cómo el sistema identifica los objetos peligrosos y la tecnología si es fácil de aplicar en un equipo móvil minero, el cual es útil para la presente investigación.

- En la tesis titulada “Estimación de la localización de un vehículo usando un sistema de visión por computador”, tuvo como objetivo principal determinar un sistema que pueda localizar un equipo móvil utilizando métodos de odometría visual. Se realizó estudios para elaborar un sistema de visión por computadora, para diseñar e implementar una herramienta de un visor artificial (cámaras) y finalmente, evaluar cómo funciona la herramienta ya implementada. Como resultado se tuvo que el sistema visual de odometría. Al implementarlo no logró los parámetros de precisión y, por lo tanto, es un sistema de soporte complementario, ya que presentó varias limitaciones (3). Este trabajo contribuye para evaluar la metodología utilizada en relación con las distancias de aproximación, lo cual es útil en la presente investigación.
- El artículo científico titulado “Detección de vehículos basada en visión por computador para sistema de ayuda a la conducción en tráfico urbano”, tuvo como objetivo principal prevenir colisiones en vehículos por alcance (colisión en la parte posterior de vehículos). Realizando un sistema que evite una colisión, detectando distancias de seguridad para un vehículo que estaría ubicado en una posición frontal y en la misma trayectoria, se utilizó cámaras y sensores basados en un sistema computarizado. Como resultado, se obtuvo que las sombras que proyectaba un equipo móvil aportaban de forma notable y significativa para el sistema propuesto de detectar y evitar colisiones, de igual forma, el sistema presentaba limitaciones por las condiciones climáticas (4). Este trabajo contribuye para evaluar cómo las sombras y las distancias entre equipos móviles se relacionan con las distancias de aproximación, lo cual es útil en la presente investigación.
- En el artículo científico titulado “Sistema móvil de detección de colisión temprana”, tuvo como objetivo principal evaluar y desarrollar un sistema que evite una colisión entre vehículos. Realizando una evaluación de viabilidad económica para todo tipo de público. Y evaluando un sistema que permita

detener una colisión entre vehículos livianos. Como resultado se logró desarrollar un prototipo que permite detectar objetos y generar una distancia de seguridad para evitar colisiones, sin embargo, no se alcanzó la exactitud y precisión esperada (5). Este trabajo permite analizar la metodología utilizada para detectar distancias que previenen una colisión de forma anticipada, el cual es útil en la presente investigación.

- En la tesis titulada “Implementación de herramientas tecnológicas y sistemas de información en el departamento de seguridad industrial para evitar la ocurrencia de incidentes en la empresa carbones del cerrejón limited”, tuvo como objetivo principal implementar un sistema de monitoreo en la operación minera para facilitar la supervisión y evitar incidentes por colisión. Se realizó una gestión de la información del sistema que previene colisiones, luego se actualizó la base de datos del sistema y finalmente se participó en los comités de actividades de peligros fatales. Como resultados obtuvieron que se podría centralizar los reportes de prevención ante una colisión y monitorear directamente la operación de mina, sin embargo, solo se quedó en una etapa donde no concreto la aplicación de tecnología (6). Este trabajo permite evaluar el sistema de prevención de colisiones, el cual es útil en la presente investigación.
- En la tesis titulada “Sistema de maniobras anticolidión en automóviles eléctricos con base en percepción LIDAR y perfiles de velocidad”, tuvo como objetivo principal diseñar un sistema que permita evadir peligros para los vehículos utilizando una tecnología llamada LiDAR. Realizando un diseño para luego construir un vehículo autónomo (eléctrico a escala). Luego implementar un subsistema que ayude a identificar objetos en la trayectoria utilizando cámara y sensores de aproximación. Y finalmente implementar un sistema que controle de forma inteligente la trayectoria del vehículo en una pista de ensayo. Como resultado, se tuvo un sistema que tenía como principal función el evadir o maniobrar y evitar colisiones utilizando la tecnología Lidar. También determinaron una metodología y una plataforma que permitió evitar colisiones; sin embargo, también tuvieron ciertas limitaciones (7). Este trabajo permite analizar fórmulas utilizadas para el cálculo de las distancias de aproximación y el sistema tecnológico que alerta y previene la colisión ante objetos peligrosos, el cual es útil en la presente investigación.
- En la tesis titulada “Diseño de una antena de bajo perfil para un sistema anticolidión embarcado”, tuvo como objetivo principal elaborar un diseño de

una antena para integrarlo con un sistema anticolidión. Realizando el diseo de un sistema electr3nico que permita relacionar entre la antena y sistema y el diseo de la antena que servir3 para identificar objetos para evitar colisiones. Como resultado, el diseo del sistema permiti3 la identificaci3n de elementos pr3ximos que podr3an ser considerados peligrosos (8). Este trabajo contribuye a la presente investigaci3n al evaluar los criterios y f3rmulas para las distancias del sistema, y el m3todo que utilizaron para la identificaci3n de elementos peligrosos.

- En la tesis titulada "Sistema anticolidi3n de grúa torre", tuvo como objetivo principal determinar bases para el desarrollo de un sistema que evite colisiones en una grúa torre, asegurando un sistema seguro y fiable durante su operaci3n. Realizando una evaluaci3n de los equipos de izaje, considerando sus radios de operaci3n. Luego evaluar el uso de diferentes sensores que puedan identificar la ubicaci3n de las grúas, y finalmente un sistema para procesar la data y actuar de forma anticipada. Como resultado, se determin3 y se implement3 sensores que enviaban informaci3n al sistema, el cual monitoreaba a los equipos de izaje, luego se identificaron zonas de interacci3n entre equipos y de esta manera se tuvo un control en l3nea base para evitar una colisi3n. Sin embargo, se tuvo varias limitaciones, dentro de ellas la accesibilidad a la tecnolog3a de punta (9). Este trabajo contribuye a la presente investigaci3n en evaluar la estrategia y c3lculos para determinar las distancias seguras entre las zonas de interacci3n de los equipos de izaje.
- En la tesis titulada "Evaluaci3n de sistemas inteligentes para la disminuci3n de accidentes en intersecciones vehiculares", tuvo como objetivo principal evaluar alternativas de sistemas que permitan prevenir accidentes en zonas de intersecci3n que no cuenten con sem3foros. Realizando una evaluaci3n de sensores y sus caracter3sticas. Luego diseo un hardware que interactúe con los sensores de aproximaci3n y finalmente generar un interfaz del software y algoritmos para su aplicaci3n con el sistema. Como resultado, se obtuvo que el sistema evita colisiones al implementar sensores en sem3foros y de esta forma analizar data por medio de c3maras (visores artificiales) y luego esta data sea procesada por un software (10). Este trabajo contribuye en evaluar c3mo se utilizaron los sensores para evitar colisiones en el sistema inteligente, y de igual forma analizar el beneficio de los sem3foros, siendo esta una posible soluci3n alterna para el c3lculo de distancias m3nimas de aproximaci3n, el cual es útil en la presente investigaci3n.

Antecedentes Nacionales

- En la tesis titulada “Optimización de equipos de carguío y transporte para el incremento de producción en la CIA minera Antapaccay espinar – Cusco”, tuvo como objetivo principal determinar el aumento de la producción, optimizando equipos de carguío y acarreo. Realizando la identificación de los principales factores que influyeron de forma negativa en las operaciones de carguío y acarreo y evaluar la reducción de costos de acarreo de material estéril. Como resultado se tuvo que la optimización en los equipos estuvo relacionada con factores de operaciones como la fragmentación del material, daños a equipos, vías para el transporte, distancias para el transporte, la pendiente que presentan las vías, entre otros (11). Estos factores aportarían significativamente en forma negativa en el aumento de costos operativos. Este trabajo permite evaluar los parámetros económicos negativos que se generan en el proceso de carguío y acarreo, y de igual forma la productividad que se desea incrementar en relación con las distancias de aproximación, lo cual es útil en la presente investigación.
- En la tesis titulada “Tecnología RFID aplicada al control de camiones de carga en el proceso de carguío y transporte en minería”, tuvo como objetivo principal mejorar los tiempos en la etapa de carguío y acarreo en el sector minero, utilizando un sistema RFID, minimizando costos y aumentando la producción. Se hizo un prototipo del sistema informático, luego se desarrolló un sistema para simular data de colas de equipos de acarreo y finalmente se utilizó la tecnología RFID para el control de la flota de acarreo. Como resultado, obtuvieron que la tecnología RFID tuvo potencial en diversas aplicaciones, el cual logró aumentar la productividad, siendo eficiente al reducir costos, donde la solución permitió controlar la flota de acarreo (camiones) en zonas estratégicas (ingreso, colas, salida y descarga) (12). Este trabajo permite analizar si la tecnología RFID aportaría y tendría alguna ventaja en la aplicación de distancias mínimas de aproximación y de igual forma evaluar las mejoras propuestas con la tecnología para reducir las demoras que terminan siendo costos operativos para una organización, lo cual es útil en la presente investigación.

Antecedentes Locales

- En la tesis titulada “Análisis de la implementación de cámaras en camiones para la reducción del índice de accidentabilidad en el transporte de mineral concentrado en la empresa Servosa SAC Arequipa”, tuvo como objetivo

principal analizar cámaras en los camiones que realizan el transporte de concentrado, analizando data estadística de incidentes. Realizando un proceso de planificación para implementar cámaras, y luego evaluando cómo reducir los indicadores de accidentabilidad. Como resultado, se tuvo que las cámaras fueron utilizadas para identificar errores o comportamientos inseguros que desarrollaban los conductores cuando se generaba un accidente, y de esta forma lograron reducir los indicadores de accidentabilidad (13). Este trabajo permite evaluar los posibles errores o actos que podrían ser factores causales cuando se genera un accidente y daños en los equipos de acarreo, a fin de considerar las propuestas de solución y considerar algunos parámetros en el cálculo de distancias mínimas de aproximación, el cual es útil en la presente investigación.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Actividad de la industria minera

La industria minera tiene una variedad de procesos para extraer, procesar y comercializar un mineral de interés, es decir, es un sector donde interactúan varios especialistas de diversas profesiones y todo para obtener una rentabilidad económica en una organización (14).

En la industria minera, se tienen varias características que lo hacen diferente de otros sectores industriales, uno de ellos es su ubicación, ya que va a depender del lugar del yacimiento para determinar el lugar donde se construirá toda la infraestructura del proceso minero metalúrgico (14).

Otra característica es la vida del proyecto minero, la cual es determinada por la cantidad del recurso mineral, y se entiende que es una actividad donde se extraen recursos no renovables, y por lo tanto tendría un inicio y un final; en caso no se tenga nuevos yacimientos, se procederá con el cierre de la mina (14).

La relación de la oferta y demanda en un sector minero tiene un comportamiento diferente a otros sectores; la demanda del mineral oscila en relación con el tiempo y si un material que en su momento fue estéril por una ley de mineral económicamente baja no sería rentable en un negocio minero, pero con un aumento del precio del mineral, este podría ser reprocesado y considerado rentable (14).



Figura 1. Industria minera – Proceso de carguío, Elaboración propia.

2.2.2 Etapas del ciclo minero

En minería, el proceso productivo tiene 5 etapas que sirven para aprovechar los recursos minerales de alto valor, estas etapas tienen un proceso variable, donde va madurando la gestión del proyecto de acuerdo con las características del yacimiento minero y del sector donde se encuentre ubicado (15).

A. Cateo y prospección.

Esta actividad tiene como fin la identificación del lugar del yacimiento minero, donde el cateo es la tarea de identificar estructuras geológicas en la superficie, lo cual podría dar como indicio la existencia de minerales de alto valor (15).

Luego de identificar una alteración geológica, la prospección es el proceso de analizar y explorar propiedades físicas y químicas de las rocas, con el uso de herramientas tecnológicas para asegurar la existencia de un yacimiento minero (15).

B. Exploración, estudios ambientales y de factibilidad.

Como segunda etapa, la exploración va a permitir determinar la cantidad de reservas y la ley del mineral que se encontró en el yacimiento minero, es por ello por lo que se deben realizar estudios más detallados, incluyendo operación de perforación, recolección de muestras, análisis de las características del mineral, entre otros, para precisar si el mineral es extraíble y cual podrían ser los costos de operación, de esta forma, los informes podrán establecer si el proyecto minero es viable (15).

Es importante precisar que en esta etapa se debe presentar un instrumento de gestión ambiental, con el objetivo de dar a conocer los aspectos ambientales del proyecto minero, ya sea por medio de una declaración de impacto ambiental o con un estudio de impacto ambiental, ese instrumento dependerá de las características del yacimiento (15).

Finalmente, la factibilidad del proyecto será presentado por un informe documentando la ingeniería, costos, viabilidad económica, reservas, leyes de corte, método de minado, planificación, mano de obra, insumos, impuestos, seguros y otros (15).

C. Desarrollo y construcción.

En esta tercera etapa, se inicia la ejecución de lo planificado para iniciar la explotación del yacimiento minero; en el estudio de factibilidad se establece el método de minado (tajo abierto o subterráneo), y de la misma forma se establecerá cuál es la estructura para utilizar, el tipo de planta de beneficio y su disposición de relaves (15).

D. Producción – explotación

En la cuarta etapa y luego de haber terminado las anteriores etapas, se puede explotar el mineral del yacimiento, con procesos y maquinarias de alta demanda y disponibilidad, sin embargo, es importante mencionar que al extraer el mineral del yacimiento, aún no tiene el valor económico para comercializarlo, este debe pasar por una planta de beneficio que debe obtener el mineral de interés y separarlo de la ganga, mediante procesos fisicoquímicos, y de esta forma poder tener realmente el mineral que servirá para obtener un beneficio económico (15).

E. Cierre y recuperación.

Como última etapa, y el final del ciclo minero, entendiéndose que los minerales son fuentes no renovables, se procede con el cierre de la mina, paralizando actividades y desarrollando una serie de actividades que deben estar detalladas en el plan de cierre, de igual forma se deberá detallar las actividades para la recuperación y rehabilitación de las áreas donde se realizó las actividades mineras, con el fin de restablecer la flora, fauna que fueron impactados antes del inicio del proyecto (15).

Es importante mencionar que las 5 etapas del ciclo minero tienen un alto grado de complejidad, siendo cada una de ellas muy importante y es imprescindible poder culminar la etapa anterior antes de poder pasar a la siguiente (15).



Figura 2. Etapas del ciclo minero, Elaboración propia.

2.2.3 Mina a tajo abierto

Conocida también como tajo a cielo abierto, se entiende que “es la actividad industrial consistente en la extracción selectiva, mediante el uso de herramientas tecnológicas mineras, de sustancias y minerales existentes ubicados en la corteza terrestre, de manera que sea financieramente beneficioso” (16. p17).



Figura 3. Tajo abierto Antapaccay. Tomada de “Revista de la Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía” (17).

En la industria minera a tajo abierto se caracteriza por movilizar gran cantidad de materiales, El área disponible de un yacimiento y su característica de material, establecen la correlación de material estéril y mineral valioso que debe ser extraído (18).

El ciclo de operaciones mina tiene como finalidad el construir y poner en marcha una operación minera; es un ciclo complejo, la peculiaridad del ciclo de un proyecto minero es que es un proceso costoso que se desarrolla en un largo periodo y con un alto riesgo, siendo una actividad muy tecnificada y de gran inversión.

El ciclo consta de 5 etapas los cuales son: la prospección, explotación, desarrollo – construcción, producción, cierre y post cierre; estas etapas requieren de un desarrollo

y están sujetos a la magnitud del proyecto, la zona o ubicación exacta, el tipo del mineral, del yacimiento minero, el capital a invertir, entre otros (19).

En la etapa de producción – extracción es importante mencionar las principales etapas en el proceso minero, siendo: perforación, voladura, carguío y acarreo. Para el desarrollo del proyecto solo nos enfocaremos en el proceso de carguío.

2.2.4 Mina subterránea

Un modelo minero subterráneo a diferencia del tajo abierto, es que las actividades de extracción son desarrolladas por debajo de la superficie terrestre, y el diseño debe considerar chimeneas, galerías, rampas, cámaras, y otras estructuras que son permitidas en el proceso de operaciones mina para una extracción de mineral de forma segura y eficiente (20)

2.2.5 Operaciones mina

El objetivo del área de operaciones mina es extraer las rocas del yacimiento minero, para luego enviarlas a las siguientes etapas para su procesamiento del mineral (dependiendo de la ley). El área de operaciones mina cuenta con 4 principales subprocesos, los cuales son: perforación – voladura, carguío – acarreo, actividades con flota auxiliar y construcción – drenaje.

A. Perforación y voladura

Este subproceso se enfoca en perforar la roca utilizando equipos de perforación y luego, colocar explosivos controlados para destruir la roca en un tamaño que sea fácil de transportar. El objetivo del proceso aplica desde la perforación de taladros hasta la ejecución de los proyectos de voladura.

Es importante detallar los diferentes conceptos de voladura, entendiendo que la voladura es la acción de fragmentar la roca utilizando explosivos, pero esta se puede conocer como voladura primaria y secundaria, donde la primera aplica a proyectos de voladura con taladros de 7 7/8” a 12 ¼” de diámetro, empleadas para macizo rocoso, y la secundaria utiliza taladros de 5” de diámetro para fragmentar proyectos pequeños.

En cuanto a la mezcla explosiva para el proceso de voladura, se utiliza el nitrato de amonio y combustible, comúnmente conocido como ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil), la cual tiene una mezcla entre el 93.5 % a 94.5 % de nitrato de amonio y 6.5 % 5.5 % de combustible líquido, el cual podría ser petróleo residual o la combinación de petróleo residual con aceite quemado.

B. Carguío y acarreo

Esta etapa se enfoca en utilizar equipos de carguío, por ejemplo, palas eléctricas, palas hidráulicas, cargadores frontales u otros que permitan cargar material mineralizado o estéril a los equipos de transporte.

Los equipos de transporte o acarreo son camiones y/o volquetes, los cuales se encargarán del traslado del material mineralizado y/o estéril desde el yacimiento hasta los posibles destinos como el área de chancado primario, botaderos o stocks de mineral.

C. Actividades con equipos de flota auxiliar

Los equipos de flota auxiliar, por ejemplo, tractores, cargadores, motoniveladoras, rodillos, excavadoras y otros, serán los encargados de habilitar, mantener y limpiar las vías y las condiciones de la mina de forma general, asegurando condiciones seguras para los principales equipos mineros.

D. Construcción y drenaje

En esta etapa, su principal objetivo es planificar y ejecutar la infraestructura necesaria para dar continuidad a las operaciones mineras mediante la construcción de obras civiles como vías, parqueos (bahías), bermas de seguridad, bocatomas, sistemas de drenaje, bombeo, entre otras.

2.2.6 Descripción operación de carguío

La etapa de carguío es la subetapa del proceso de operaciones mina, la cual consiste en la extracción del mineral que fue fracturado por un proceso de voladura, este material es recogido (cargar) por un equipo llamado pala minera, luego es levantado y descargado en un equipo de acarreo (camión minero).

La operación de carguío es una operación unitaria primaria en la etapa de extracción de mineral, y su valor reside en el hecho de agregar valor directamente en el ciclo productivo del mineral de interés, teniendo dentro de sus principales usos el de remover, cargar y descargar el material fragmentado hacia la tolva de un camión, para que este sea trasladado hacia la planta de beneficio o hacia un desmonte, dependiendo del tipo de material.



Figura 4. Grandes camiones y palas: Un match que apunta a mayor rendimiento. Tomada de “Revista minería chilena” (21).

A. Rendimiento de equipos

Desde un punto de vista teórico es el desempeño el cual logra producir un equipo con ciertas características y/o condiciones en un tiempo determinado.

Este indicador de rendimiento determina la eficiencia en la operación del equipo móvil minero, y, por lo tanto, determinará el logro de la producción según el plan de minado.

Para determinar el rendimiento de un equipo, se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad producción real}}{\text{Cantidad producción teórica}} \times 100)$$

B. Productividad en equipos

Se encarga en medir y poder calcular la relación de cantidad de material que ha sido productivo por un equipo móvil respecto al tiempo el cual ha sido planificado, enfocándose en el acatamiento de las metas planificadas en la producción por la unidad minera; este indicador permitirá conocer el valor que representa el equipo en relación con lo que produce una empresa minera, y de esta forma poder optimizar los recursos de acuerdo con los indicadores establecidos.

Para determinar la productividad en el proceso de carguío se debe considerar la siguiente ecuación:

$$Productividad = \frac{Cantidad\ producción}{Tiempo}$$

C. Costos hora para equipos móviles

El costo hora total es establecido por el costo hora de posesión del equipo evaluado más el costo hora de operación y finalmente el costo hora del operador del equipo móvil (22).

Para determinar este costo hora total se debe considerar la siguiente ecuación:

$$Costo\ hora\ total = Cost\ h\ Posesion + Cost\ h\ Operacion + Cost\ h\ Operador\ del\ equipo$$

La fórmula de costos horarios de equipos mineros, está enfocada en dos aspectos principales: costos por posesión y de operación de los equipos, los cuales tienen variables específicas en cada aspecto, es decir, los costos de posesión incluyen la depreciación, interés de capital invertido, impuestos, seguros, y almacenamiento; y en cuanto a los costos de operación incluye lubricantes, combustible, filtros, grasas, orugas o neumáticos, piezas de desgaste, mantenimiento y reparación y operario especialista (22).

D. Disponibilidad

Es la relación de las horas nominales de los equipos que estaban en condiciones mecánicas y eléctricas para su uso, este porcentaje tiene una gran relación entre la eficiencia de las horas del mantenimiento (23).

Para determinar la disponibilidad se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% Disponibilidad = \frac{Horas\ nominales - Horas\ mantencion\ y\ reparacion}{Horas\ nominales} \times 100)$$

E. Factor de utilización

Es el porcentaje donde el equipo se encuentra efectivo en sus horas operativas (23).

Para determinar el factor de utilización se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% Factor\ de\ utilizacion = \frac{Horas\ efectivas}{Horas\ operativas} \times 100)$$

F. Utilización en base nominal

Es el porcentaje basándose en horas nominales donde el equipo se encuentra efectivo, este indicador da a conocer la operación eficiente que se da al equipo (23).

Para determinar la utilización en base nominal se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% Utilizacion(base nominal) = \frac{Horas\ efectivas}{Horas\ nominales} \times 100)$$

G. Utilización en base disponible

Es el porcentaje donde el equipo se encuentra efectivo en sus horas disponibles, este indicador da a conocer en la operación la eficacia en el uso del equipo (23).

Para determinar la utilización en base disponible se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% Utilizacion(base disponible) = \frac{Horas\ efectivas}{Horas\ disponibles} \times 100)$$

H. Utilización operativa

Es el porcentaje donde el equipo se encuentra operativo, este indicador da a conocer el excedente que está disponible (23).

Para determinar la utilización operativa se debe considerar la siguiente ecuación:

$$\% Utilizacion\ operativa = \frac{Horas\ operativas}{Horas\ disponibles} \times 100)$$

I. Equipos mineros

Dentro de una operación a tajo abierto se tiene varios equipos que son útiles en el proceso de extracción del mineral, iniciando con las perforadoras, que son equipos diseñados para perforar material rocoso, luego estas perforaciones se llenan de explosivos los cuales fragmentan la roca para una remoción más eficaz.

Los equipos de la etapa de carguío se pueden mencionar a las palas eléctricas e hidráulicas, donde las eléctricas emplean energía eléctrica y las hidráulicas utilizan energías hidráulicas y mecánicas para su movimiento, accionamiento y control, estos equipos están diseñados para cargar material fragmentado que fue resultado de la etapa de voladura para luego cargarlo a los camiones mineros.

El material mineralizado y/o estéril que ha sido fragmentado en el proceso de voladura es transportado normalmente por camiones mineros, siendo los posibles destinos la planta de beneficio para su procesamiento, y en caso el material sea estéril, su destino serían botaderos.

J. Pala minería 4100XPC – Joy Global - P&H

Conocido como pala de cables eléctrica, como pala electromecánica o pala mecánica, pala eléctrica o pala de cables, es un modelo de excavadora frontal eléctrica autopropulsada, sobre orugas, que utiliza cables para activar el movimiento del cucharón. Específicamente, el modelo 4100XPC de Joy Global – P&H es un equipo de alto rendimiento en la producción, diseñado para la tarea de carguío con tecnología para lograr una buena disponibilidad y eficiencia en la producción (24).

K. Camión minero 797F – Cat

También conocido como equipo de acarreo pesado, es un equipo de volteo de carrocería rígida, singularmente diseñado para ser utilizado en el rubro de gran minería. Específicamente, el camión 797F – Cat es un equipo que proporciona un alto rendimiento en operaciones mineras, ofreciendo una buena eficiencia en la tarea de acarreo (25).

2.2.7 Modelos matemáticos

Como definición, un modelo se podría enunciar de la siguiente manera: “Un modelo es una representación gráfica, esquemática o analítica de una realidad, que sirve para organizar y comunicar de forma clara los elementos que la conforman y sus relaciones” (26, p. 8).

También se puede expresar la definición de un modelo matemático de la siguiente forma: “Un modelo matemático es la representación simplificada de la realidad, mediante el uso de funciones que describen su comportamiento, o de ecuaciones que representan sus relaciones” (26, p 9).

Es importante precisar que un modelo matemático nos va a permitir desarrollar una solución de forma estructurada y lógica a un problema por resolver, para ello, se debe conocer las funciones matemáticas y su representación que servirán como línea base para el desarrollo del propósito del trabajo de investigación:

- Funciones lineales: Es una función expresada con la siguiente estructura:

$$y = ax + b$$

Siendo a y b números reales denominados parámetros (26).

- Funciones cuadráticas: Es una función que se expresa de la siguiente manera:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Donde a, b y c son números reales denominados parámetros (26).

- Funciones exponenciales: Es una función que se expresa de la siguiente forma:

$$y = ax$$

Donde $a > 0$, "a" es diferente a 1, y "a" es un número real. (26)

- Funciones logarítmicas: Es una función que se expresa de la siguiente forma:

$$y = \log_a x$$

Sí y solo si $a^y = x$; donde $a > 0$, "a" es diferente a 1 y "a" es un número real (logaritmo en base "a") (26).

- Funciones trigonométricas: es la función que en medida se basa y se relaciona con los ángulos y lados de un triángulo, y sus funciones seno, coseno, tangente y las funciones alternas cotangente, secante y cosecante (26).

Un modelo matemático empírico se basa en la experiencia y las funciones matemáticas para establecer un planteamiento a una posible solución, considerando variables que son inherentes a la problemática que se esté analizando, para luego formular una ecuación y así poder interpretar una solución final al problema.

A. Función lineal

Una función lineal se representa con una gráfica que tiene una tendencia de coordenadas para trazar una línea recta; de esta forma, se interpreta que la transformación de la función lineal es un caso específico que se desarrolla en un campo de estudio de números reales (\mathbb{R} en \mathbb{R}) y, por lo tanto, sería una función \mathbb{R} en \mathbb{R} , obteniendo una gráfica de una línea recta sobre coordenadas.

La función lineal con respecto a sus principales propiedades y teoremas, se puede mencionar que este modelo matemático presenta una característica llamada proporcionalidad, para ello citaremos la siguiente definición: Dos magnitudes se consideran proporcionales cuando existe una relación entre ellas de tal manera que al multiplicar una cantidad de una de las magnitudes por un número, la cantidad correspondiente de la otra magnitud se multiplica o se divide por el mismo número. Si esto ocurre de forma que ambas aumentan o disminuyen juntas, se habla de proporcionalidad directa; en cambio, si una aumenta mientras la otra disminuye, se refiere a proporcionalidad inversa. Así, las magnitudes se clasifican como directa o inversamente proporcionales (27).

Se puede concluir que la proporcionalidad es una función $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, lo que significa que cualquier número real c , x está en una función:

$$f(c, x) = c \times f(x)$$

denominada proporcionalidad directa, también, si $a = f(1)$, se tendría que:

$$f(c) = f(c, 1) = c \times f(1) = c \times a$$

esto es que $f(c) = a \cdot c$, donde “c” es un número real. Finalmente, si damos una igualdad donde $c = x$, la función sería:

$$f(x) = a \times x$$

y esto es una magnitud que es directamente proporcional a “x”, donde se concluye que:

$$y = a \times x$$

Con respecto a la función afín, se puede afirmar que es aquella que está relacionada a un número “x” y otro número “ax+b”, donde “a, b”, son números fijos que pertenecen a los números reales y se expresa de la siguiente forma (28):

$$y = f(x) = ax + b, \forall a \in R, b \in R, \geq (0)$$

2.2.8 Productividad y calidad de costos

Las empresas, ya sean del sector minero u otras, presentan una serie de gastos en el día a día, los cuales deben ser gestionados de una forma eficiente, evaluando cada decisión que se toma (costo – beneficio) con relación a los presupuestos planificados contra lo real (29).

Los costos unitarios en minería deben ser correctamente identificados antes, durante y después en un ciclo de producción minera, con el fin de mejorar la productividad, el cual se refiere al tener mejores resultados de producción con igual o menos inversión, logrando así una mayor utilidad (29).

También existe un término llamado lucro cesante, el cual corresponde a la ganancia o ingreso neto estropeado o truncado en consecuencia de una interrupción en un proceso productivo, generando pérdidas económicas que impactan directamente a la utilidad de la empresa (30).

De esta forma, se puede resaltar que la gestión y calidad de costos influye en las decisiones tomadas, teniendo en cuenta los precios de venta o comercialización, conociendo el tiempo del proceso productivo, y aplicando mejoras en los procesos para minimizar la probabilidad de ocurrencia de eventos fortuitos que podrían generar un lucro cesante, y en consecuencia asegurar un incremento en la productividad como un beneficio empresarial (30).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Seguidamente, se dará a conocer algunos conceptos utilizados en la presente investigación que servirán para dar un significado específico de acuerdo con el contexto y objetivos establecidos en el presente trabajo de investigación:

- **Económicamente rentable:** la rentabilidad es un indicador financiero que es útil para calcular el beneficio económico que retornará luego de una inversión, y esta rentabilidad está directamente relacionada con los ingresos y egresos del mineral de interés, en otras palabras, mientras el mineral tenga un mejor precio de venta y los costos no sean mayores a los ingresos, la operación minera será económicamente rentable.
- **Mineral valioso:** En la corteza terrestre existen diferentes tipos de minerales, y algunos de ellos poseen un valor de venta mucho más alto otros, como lo son: el cobre, la plata, el oro y aun otros más extraños como el rodio, el paladio y platino, siendo estos 3 últimos muy escasos; por lo tanto, se puede mencionar que un mineral valioso es aquel que tiene un gran valor de venta, y a su vez podría ser escaso, también conocido como mena, y este mineral es destinado a la planta de beneficio para obtener el producto final.
- **Material estéril:** También conocido como ganga, este tipo de material no posee minerales de interés, y está acompañando a la mena, lo que representa un costo en el proceso de explotación, este tipo de material estéril es indeseable en el proceso productivo y solo es destinado a botaderos.
- **Prospección:** En el proceso de exploración, la prospección es la actividad donde se realiza una investigación en campo para identificar regiones con mineral valioso, haciendo uso de métodos fisicoquímicos, uso de instrumentos y métodos de precisión.
- **Explotación:** Este proceso se enfoca en la extracción, es decir, es la actividad donde se extrae los minerales de gran valor que se ubican en la corteza terrestre en su forma natural, para luego ser procesados en una planta de beneficio.
- **Producción:** El mineral valioso luego de ser extraído de la corteza terrestre es enviado a una planta de beneficio, esta podría ser una planta para tratar minerales sulfurados u óxidos, y luego se tendría el producto final que serían concentrados o cátodos, dependiendo del proceso metalúrgico; y este ciclo terminaría en su comercialización.
- **Cierre y post cierre:** Son actividades finales para evitar y/o corregir un posible aspecto negativo (pasivos ambientales) que podría perjudicar al entorno donde se desarrolló el proyecto minero, en otras palabras, es la conclusión de las

labores mineras, donde se debe reponer el área lo más cercano a como se encontró inicialmente.

- **Perforación:** Parte del proceso de extracción y tiene por objetivo realizar orificios en el macizo rocoso con una distribución definida para luego poder cargar explosivos, esta actividad se puede desarrollar por diferentes técnicas, y el equipo a utilizar son perforadoras.
- **Voladura:** Operación unitaria parte del proceso de extracción, y tiene como finalidad fragmentar la roca a una granulometría determinada.
- **Carguío:** Operación unitaria del proceso de extracción, donde se utilizan equipos que tienen la capacidad y el diseño para cargar o retirar el material que es producto de la voladura para luego descargarlo en un equipo de transporte o acarreo.
- **Acarreo:** Parte del proceso de extracción, normalmente se utiliza camiones o volquetes; el tamaño del camión dependerá del objetivo a producir en la planta de beneficio, y su función es transportar el material que es producto de la voladura hacia dos posibles destinos: hacia la planta de beneficio (transportando mineral valioso), y hacia un botadero (transportando material estéril).
- **Eficiencia operativa:** Medida del desempeño real de los equipos en el momento que están siendo utilizados para una determinada actividad o tarea, siendo así el rendimiento real y este será evaluado con el rendimiento teórico (23).
- **Productividad de equipos:** Es el porcentaje de la utilización y la eficiencia operativa, donde se da a conocer que tan productivos son los equipos, es decir, es la relación del producto (toneladas de material extraído) que genero el equipo con respecto a las horas efectivas del trabajo.
- **Plan de minado:** En el proceso de planeamiento de minado, la estrategia es plasmada en un documento que detalla las actividades a desarrollar durante un año, considerando actividades de identificación de límites de exploración, preparación, explotación, beneficio, métodos, parámetros de trabajo, equipos a utilizar, presupuesto, costos, medidas de seguridad y salud ocupacional, controles ambientales, entre otros, y todo ello cuantificado en metas objetivas(31).
- **Funciones matemáticas:** Una función se entiende como la forma matemática de expresar la relación entre dos variables (magnitudes), para expresar de forma lógica y estructurada la solución a una problemática que podría darse en la vida cotidiana y/o profesional.

- **Función lineal:** Una función polinómica de primer grado, la cual es característica por graficar líneas rectas; $F(x) = mx + b$, donde $F(x)$ es igual a la variable dependiente, x es la variable independiente, m es la pendiente y b es el término dependiente.
- **Proporcionalidad:** Es la relación que se genera entre dos valores o magnitudes en igual proporción, es decir, cuando se habla de una proporcionalidad directa, se refiere al aumento constante de un valor con relación a otra magnitud, y cuando se habla de proporcionalidad inversa, es al descenso constante de un valor con relación a otra magnitud.
- **Puntos ciegos:** Son espacios, lugares o zonas que no se logra visualizar en los espejos retrovisores u otros espejos que pueda tener un equipo en movimiento, y esto varía dependiendo del tamaño, modelo del equipo, teniendo como puntos ciegos normalmente la estructura de la carrocería, parte lateral inferior, parte posterior y superior.
- **Aproximaciones críticas:** Se define como la distancia que tendría un equipo de acarreo al interactuar con un equipo de carguío en movimiento en un radio con riesgo de colisión, teniendo una consecuencia alta, es decir, que podría conllevar a la muerte de una persona y daños materiales significativos.
- **Distancia mínima:** Se refiere a la distancia que se debe asegurar entre dos equipos en movimiento, y no representa riesgo alguno de colisión; esta distancia mínima sería el umbral con la distancia de aproximación crítica.
- **Demora operativa:** Las demoras están siempre relacionadas con el tiempo, y cuando se menciona demora operativa se relaciona entre el tiempo y la improductividad, generando una cadena de pérdidas impactando directamente en las ganancias de la empresa minera. La demora operativa puede generarse desde actividades menores como la espera de un equipo, pero las demoras por mantenimiento estarán directamente relacionadas con la disponibilidad del equipo.
- **Daños a equipos:** Es la consecuencia de un accidente, generado por un comportamiento o una condición de riesgo subestándar, los cuales provocan pérdidas en los equipos, esta es una problemática en todo el sector minero y en diversos rubros, donde si no se logra implementar medidas de control, las consecuencias serían desastrosas.
- **Medidas de control:** Están relacionadas con la jerarquía de controles, esta jerarquía se conoce por tener 5 niveles: Eliminación, sustitución, ingeniería, administración y equipos de protección personal; para el caso de estudio se

aplicará el desarrollo de un modelo matemático el cual está enfocado en dar una solución de ingeniería.

- **Lucro cesante:** Se puede definir como lucro cesante el ingreso que se deja de ganar por la ocurrencia de un evento fortuito que está generando la detención de un equipo en un proceso productivo.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 MÉTODO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación presenta la siguiente ilustración:



Figura 5. Metodología de la investigación.

Nota: Elaboración propia.

- **Método de la investigación**

Por las características del proyecto de investigación el método identificado es de tipo cuantitativo, ya que la necesidad del trabajo de investigación requiere medir y calcular magnitudes de las distancias mínimas de aproximación, y para ello se requiere seguir una secuencia estructurada para finalmente la relación causal de las variables (32).

Por otro lado, la investigación será deductiva, por la relación causal, y la aplicación de teorías y lógica deductiva para dar una solución al problema planteado (32).

- **Alcance de la Investigación**

El alcance de la investigación será un estudio correlacional, porque se pretende relacionar variables mediante un patrón, el cual representará la solución a la problemática (32).

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño para la investigación es cuasi experimental, debido al análisis de relación causa efecto para determinar soluciones al problema planteado, y longitudinal debido al tiempo es un factor determinante, ya que el análisis se puede hacer en algunos años (32).

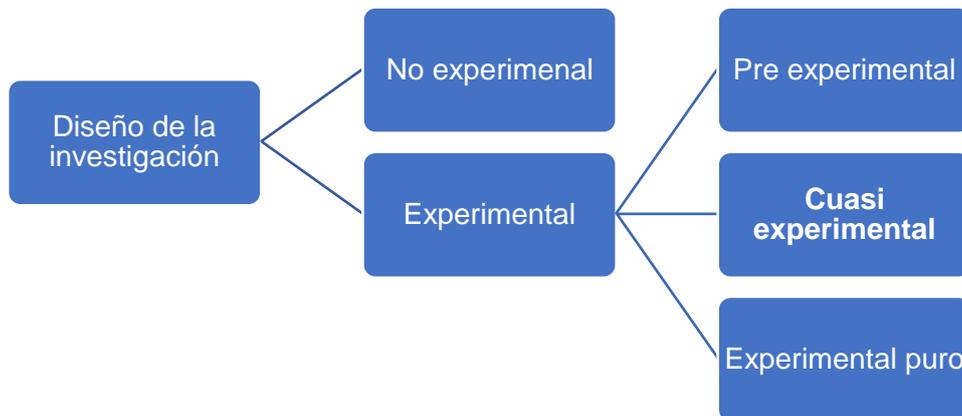


Figura 6. Diseño de la investigación
Nota: Elaboración propia.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

- **Población**

La población identificada son todos los equipos que interactúan en el proceso de carguío de la gerencia de operaciones mina, estos equipos están conformados por palas y camiones mineros.

- **Muestra**

Se tiene como muestra a 21 equipos mineros, 3 palas y 18 camiones, estos equipos están operando a cargo de la gerencia de operaciones mina y tienen un régimen de trabajo atípico de 10 x 10.

Tabla 2.*Listado de equipos marcas y capacidades*

CANTIDAD	EQUIPO	MARCA	MODELO	CAPACIDAD
4	Pala eléctrica	CAT	7495HR	27.5 a 60.4m ³ (36 a 79yd ³)
2	Pala eléctrica	P&H	2800XPB	26.8 a 33.6 m ³ (35 a 44 yd ³)
1	Pala eléctrica	P&H	4100XPC	52.8 a 61.2 m ³ (69 a 82 yd ³)
8	Camión minero	CAT	793D	232 ton
25	Camión minero	CAT	797F	363 ton
4	Camión minero	KOMATSU	830E	221 ton
27	Camión minero	KOMATSU	980E	363 ton
9	Camión minero	KOMATSU	930E	290 ton

Nota: Elaboración propia.

Para determinar la muestra se realizó con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Donde:

- Número de la población (N) = 80 equipos.
- Grado de confianza (Z) = 1.96
- Error estimado (e) = 8 %
- Posibilidad de ocurrencia (p) = 95 %
- Posibilidad de no ocurrencia (q) = 5 %
- **Tamaño de muestra (n) = 21 equipos**

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

- Las técnicas empleadas en el proceso de investigación incluyeron entrevistas a operadores, la observación de los equipos móviles, y recolección y análisis de data, los cuales se detallarán a continuación:
 - La entrevista: Se llevó a cabo una entrevista personalizada con 3 operadores de palas y 18 operadores de camiones mineros. Esta técnica permitió recolectar datos sobre las condiciones y el proceso de operación en la etapa de carguío.

La entrevista se realizó en el entorno laboral, solicitando a la supervisión de operaciones en mina que se facilitaran 5 minutos durante las

reuniones de inicio de turno. Este proceso se extendió aproximadamente por 30 días.

Las entrevistas fueron directas y se formularon preguntas concretas a los operadores; Sin embargo, se presentaron ciertas limitaciones de tiempo, ya que el área de mina tiene una alta demanda y, al ser un proceso crítico, no puede detenerse para llevar a cabo actividades no planificadas.

- La observación de campo: Esta técnica permitió profundizar de manera estructurada en la raíz de la problemática, relacionando la información obtenida en las entrevistas con el proceso de carguío.

En el campo, se utilizaron cuadernos de notas y listas de cotejo para verificar aspectos críticos. Se observó que muchos de los camiones enfrentaban dificultades para ingresar, evidenciándose, que en varias ocasiones, retrocedían y debían salir nuevamente para posicionarse adecuadamente, permitiendo así que la pala pudiera descargar el material en la tolva.

Es importante señalar que, durante el proceso de observación en campo, se observó que los camiones al posicionarse para el carguío, reducen su velocidad a 10 km/h, se acercan a una distancia de 20 metros del equipo de carguío, luego giran hacia la derecha hasta colocarse en posición de retroceso, después para iniciar el retroceso, se guían utilizando los espejos retrovisores, las pértigas y la presentación del cucharón de la pala. En este proceso, no se ha establecido una distancia específica entre la pala y el camión, lo que deja este parámetro a criterio de cada operador. Sin embargo, se ha identificado que la distancia varía entre 10 y 24 metros, (17 metros de promedio), lo que resulta una ubicación inexacta para ambos casos.

Esta observación en mina se llevó a cabo durante aproximadamente 18 días, tiempo durante el cual se recolectaron datos e información específica sobre los equipos, así como imágenes y videos.

- Análisis y recolección de data: Se consideraron diversas fuentes como datos secundarios, incluyendo libros, investigaciones similares, reportes, artículos, archivos digitales y páginas de internet relacionadas con el tema de investigación, así como normativa legal nacional. El objetivo de esta recopilación fue obtener información clave para validar la hipótesis y los resultados.

- Los instrumentos utilizados para garantizar una correcta toma de datos, asegurando que se realice de manera estructurada y metódica, fueron los siguientes:
 - Cuestionario (con preguntas mixtas).
 - Cuaderno de notas (para registros anecdóticos).
 - Lista de cotejo.
 - Computadora portátil.

El cuestionario se aplicó a los operadores de camiones y palas mineras, y se abordó a través de las siguientes preguntas:

- Mencione el tipo de equipo móvil que utiliza.
- ¿Usted ha identificado puntos ciegos cuando la pala está girando / cuando el camión está retrocediendo o avanzando?
- ¿Tiene alguna referencia donde ubicarse cuando el camión está retrocediendo / cuando gira la pala para descargar?
- ¿Su actividad requiere que este muy cerca del camión / pala?
- ¿Ha identificado si el área donde va a ingresar es la suficiente?
- ¿Ha parado su equipo varias veces por mantenimiento correctivos?
- ¿Ha sufrido daños el equipo por golpes de la pala minera durante el carguío?
- ¿Ha sufrido daños el equipo por golpes del camión durante su retroceso o avance?
- ¿Usted cree que si tuviera un sistema que le facilite la aproximación hacia la pala en retroceso podría mejorar la operación del equipo y reducir daños?
- ¿Conoce el impacto económico que representa si un camión o pala minera sufre un daño y cuanto impacta a la productividad?
- ¿Qué alternativas de solución propone para evitar una colisión entre camiones y palas mineras?

La siguiente figura presenta los resultados de las preguntas formuladas, expresados en valores porcentuales. Se diseñaron 9 preguntas clave para evaluar la necesidad de implementar mejoras. En este contexto, una respuesta positiva de un trabajador indicaba un 100 % de necesidad de mejora. Los resultados revelan que el número máximo de afirmaciones positivas alcanzadas por los operadores fue de 8, mientras que el mínimo de respuestas negativas fue de 4. En promedio, los operadores de palas mostraron un 67 % de aceptación hacia las mejoras propuestas, mientras que los operadores de camiones mostraron un 63 % de aceptación. Estos porcentajes

reflejan el grado de acuerdo entre los operadores sobre la necesidad de mejoras en el proceso de carguío.

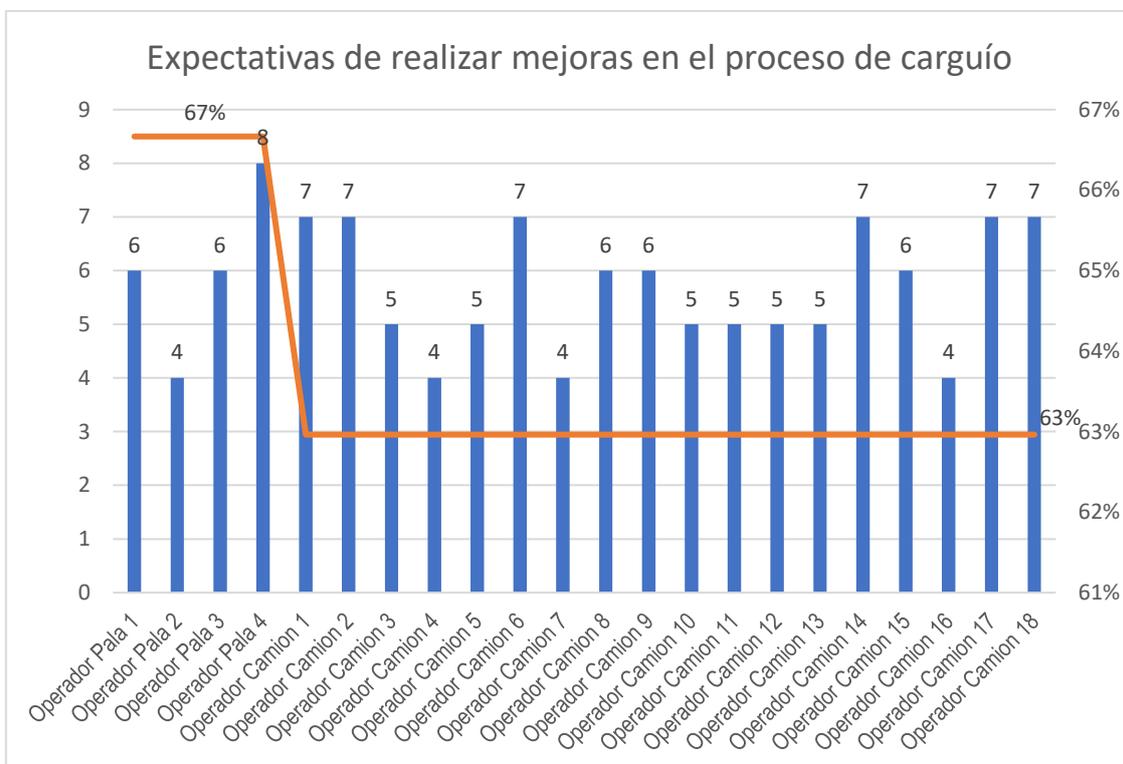


Figura 7. Resultados del cuestionario.

Nota: Elaboración propia.

El cuaderno de notas y la lista de cotejo resultaron de gran utilidad durante el proceso de observación en campo, permitiendo registrar información clave sobre el proceso de carguío e identificar oportunidades de mejora en la interacción entre los camiones y la pala. Se cuantificaron las ocasiones en que el camión avanzaba y retrocedía hacia la zona de carguío, así como los giros y movimientos de la pala al cargar el cucharón y durante la descarga. Toda la evidencia fue anotada en el cuaderno y en la lista de cotejo, además de realizar tomas de video del proceso de carguío.

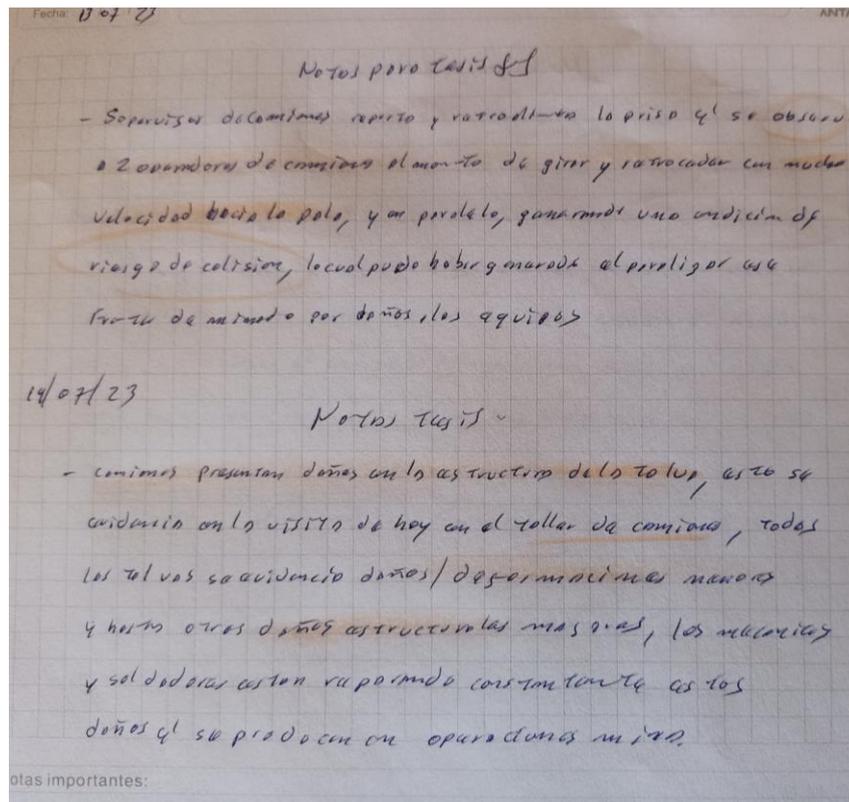


Figura 8. Evidencia del cuaderno de notas.
Nota: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico se ilustra que el nivel de necesidad de mejora identificado es 4, lo que se clasifica como una "necesidad alta" de implementar mejoras. Este nivel se debe a las desviaciones observadas entre la posición de los camiones y las palas durante el proceso de carguío. Estas desviaciones comprometen la seguridad de la operación, aumentando el riesgo de colisiones, lo cual puede tener impactos negativos significativos en la productividad.

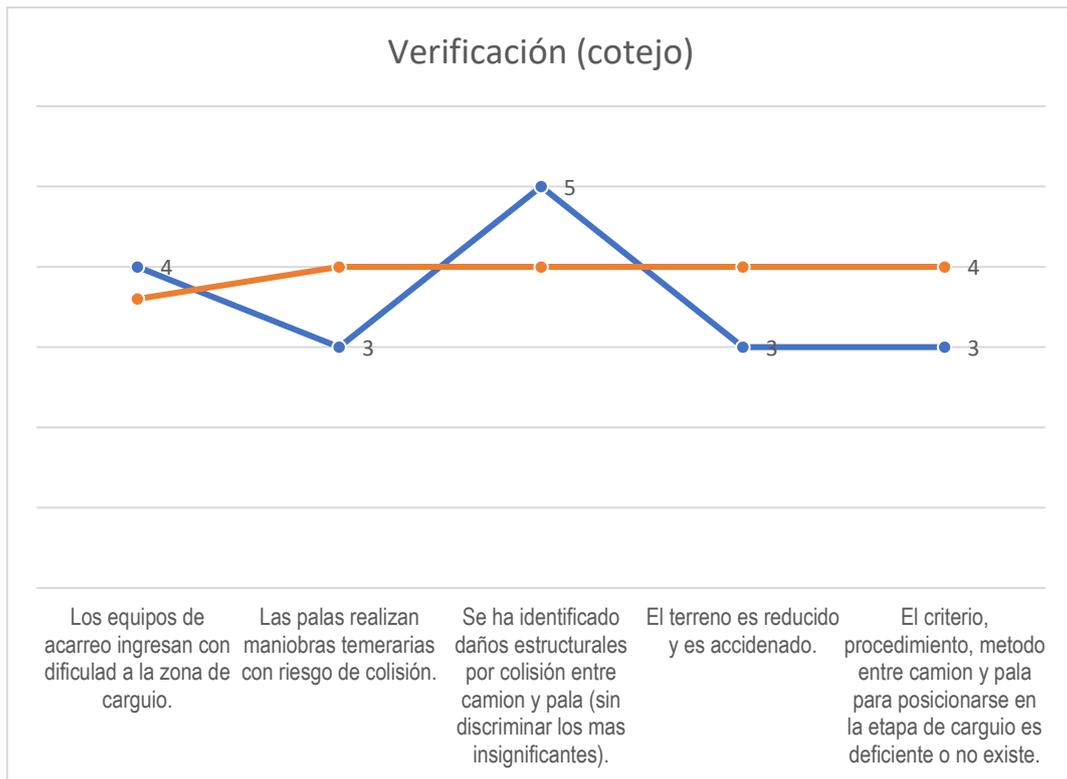


Figura 9. Resultado de la lista de verificación (cotejo).

Nota: Elaboración propia.

En cuanto a la computadora portátil, se utilizaron programas de Microsoft Office para analizar y procesar la información, lo cual fue útil en el proceso de recolección de datos.

Estos instrumentos me permitieron definir parámetros y criterios para establecer una línea base que facilite la solución de la problemática.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

4.1.1 Análisis de aproximaciones críticas entre equipos en el proceso actual de carguío

Durante el proceso de recopilación de datos en campo y el análisis de datos primarios y secundarios, se determinó plantear las variables para el modelo matemático en función de los dos principales equipos que interactúan en el proceso de carguío: la pala 4100XPC y el camión 797F.

Consecuentemente, en la figura se muestra la interacción de los equipos que forman parte de la evaluación:



Figura 10. Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H” (25).



Figura 11. Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar” (26).

En esta etapa se requirió identificar y analizar el impacto de las aproximaciones críticas entre los equipos mineros (pala y camión). Por ello, es imprescindible conocer los puntos ciegos de cada equipo cuando el camión está retrocediendo hacia la pala minera.

En la siguiente tabla, se identifican los principales movimientos que realizan los equipos en el proceso de carguío, los cuales están directamente relacionados con las variables de interés del presente estudio. El principal objetivo de identificar las actividades de movimiento de los equipos mineros fue conocer la secuencia operativa para establecer y estructurar los parámetros en el modelo matemático.

Tabla 3.

Identificación de principales operaciones

Equipo	Operación de equipos			
	Operación de giro de la Pala	Operación de carga y descarga de la Pala	Operación de retroceso Camión	Operación de avance Camión
Pala 4100XPC – Joy Global P&H	x	x		
Camión minero 797F – Cat			x	x

Nota: Elaboración propia.

Luego de identificar los principales movimientos de los equipos mineros, se elaboró un mapeo de identificación de puntos ciegos. Este consistió en desarrollar un mapa de calor para resaltar las zonas de riesgo y de alta probabilidad de colisión, que representan puntos ciegos para el operador. Este mapeo se muestra en la siguiente figura:

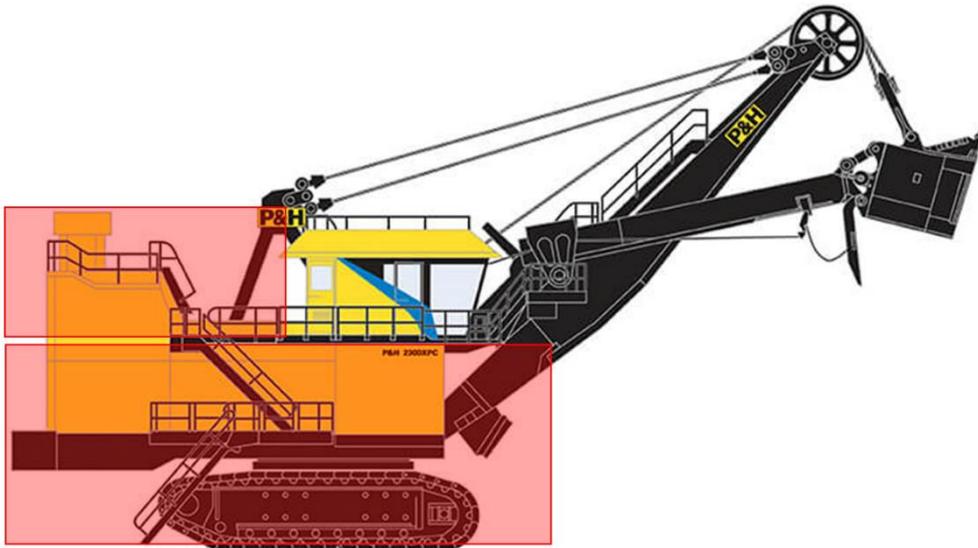


Figura 12. Mapa de calor de puntos ciegos: Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H” (25).

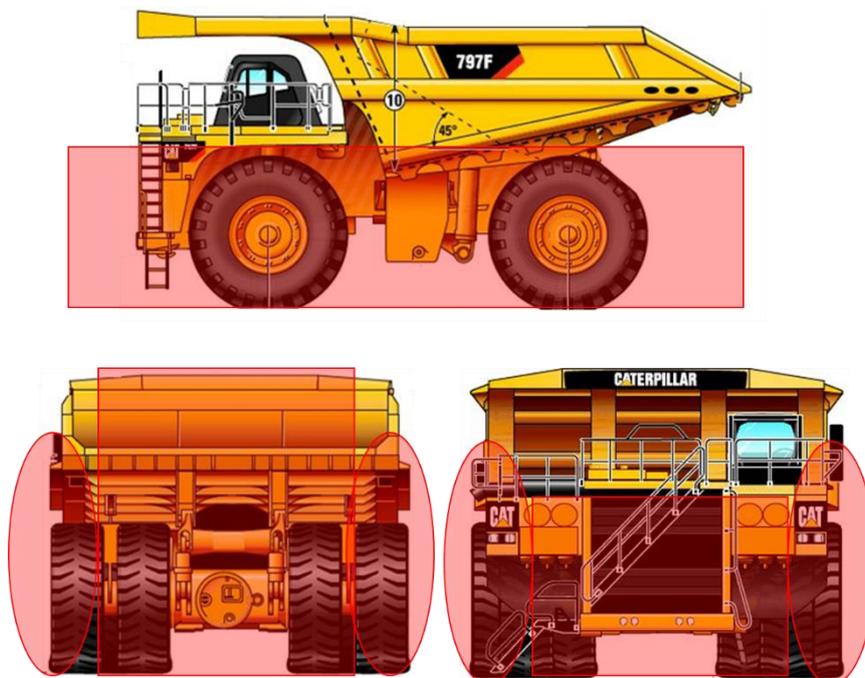


Figura 13. Mapa de calor de puntos ciegos: Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar” (26).

Después de elaborar el mapa de calor de puntos ciegos, se vinculó la información con los principales movimientos y los puntos ciegos de los equipos. Se analizó y se identificó que existía un potencial de generar daño a la propiedad, lo que impacta directamente en la productividad del proceso de carguío. En la siguiente figura se muestra la correlación entre los puntos ciegos y la secuencia de actividades de la operación.

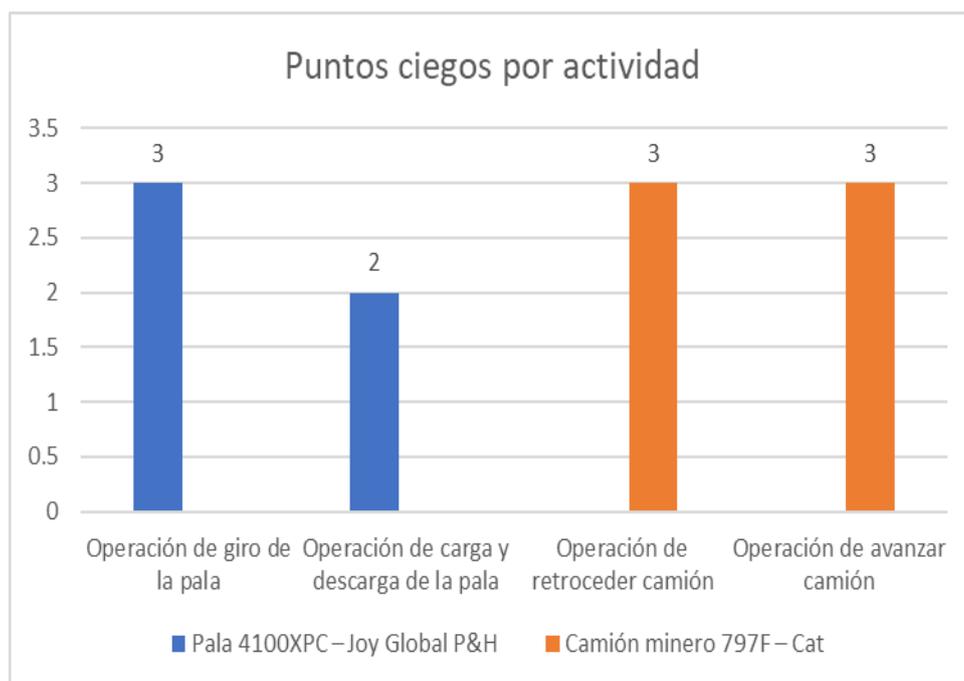


Figura 14. Puntos ciegos por actividad.
Nota: Elaboración propia.

Después de determinar y analizar la cantidad de puntos ciegos por equipo y correlacionar con la operación unitaria de carguío, se procedió a recopilar datos de un módulo informático llamado "HSEC WEB". El objetivo fue identificar la cantidad de incidencias reportadas en las interacciones entre los equipos pala y camión. Además, se realizó una trazabilidad con la información recolectada en campo, identificando inicialmente que los camiones no estaban ingresando correctamente hacia la pala, lo que dio como resultado lo siguiente:

Tabla 4.*Identificación de aproximaciones críticas*

Identificación de aproximaciones críticas hacia la Pala 4100XPC														
Equipo	Turnos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Camión minero	Turno día	2	4	4	4	3	4	2	5	4	7	4	7	50
797F – Cat	Turno noche	3	2	6	4	7	4	3	5	5	4	5	7	55

Nota: Elaboración propia.

La tabla anterior muestra la frecuencia con la que se realizan acciones de riesgo que podrían haber involucrado accidentes de mayor escala. Se han considerado algunos registros al azar en la sección de anexos.

Después de identificar las aproximaciones críticas por turno y por mes, se contabilizaron un total de 105 desviaciones durante un año. El resumen de estos datos se presenta en la siguiente figura:

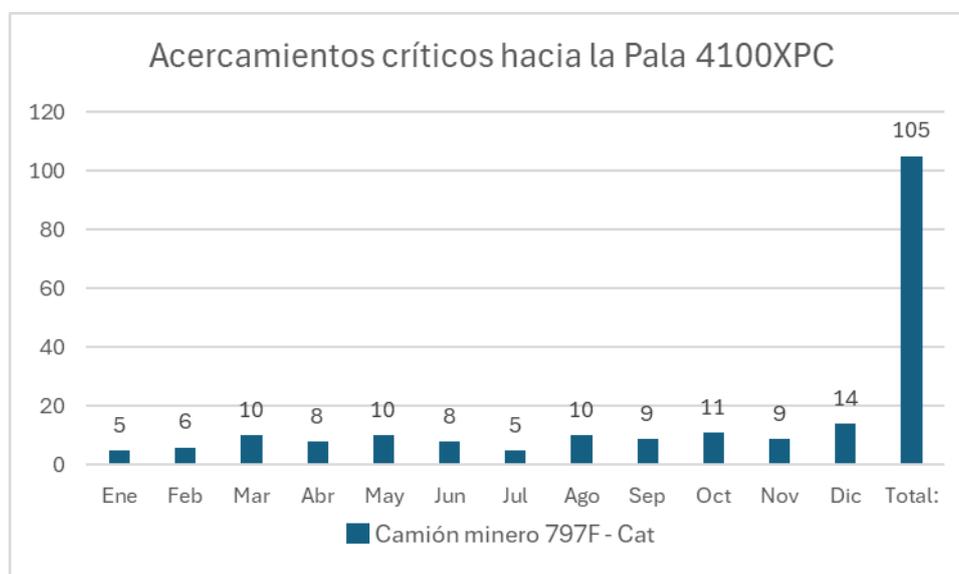


Figura 15. Aproximaciones críticas al año.

Nota: Elaboración propia.

Para concluir esta etapa, se realizó una relación cuantitativa entre la cantidad de aproximaciones críticas y el número de camiones evaluados. El resultado se muestra en la Tabla 5.

Los ratios encontrados reflejan que los camiones mineros han generado, mensualmente, aproximaciones críticas que podrían causar daños entre equipos

durante el proceso de carguío, con ratios que varían desde 0.3 en enero hasta 0.8 en diciembre.

Tabla 5.

Ratio de aproximaciones críticas

Ratio de aproximaciones críticas			
	N° de Camiones	Aproximaciones críticas	Ratio AC
Ene	18	5	→ 0.3
Feb	18	6	→ 0.3
Mar	18	10	↑ 0.6
Abr	18	8	→ 0.4
May	18	10	↑ 0.6
Jun	18	8	→ 0.4
Jul	18	5	→ 0.3
Ago	18	10	↑ 0.6
Set	18	9	↑ 0.5
Oct	18	11	↑ 0.6
Nov	18	9	↑ 0.5
Dic	18	14	↑ 0.8

Nota: Elaboración propia.

En otras palabras, los ratios de aproximaciones críticas (AC) indican la relación directa entre las interacciones de los camiones y la probabilidad de generar un accidente por colisión contra la pala minera. A medida que el ratio es más alto, la probabilidad de ocurrencia aumenta, volviéndose más crítica.

En el cuadro anterior se puede observar que en diciembre se registró un ratio de 0.8, lo que implica que los 18 camiones tuvieron un 80 % de probabilidad de causar un daño a la pala, afectando negativamente la productividad.

Por lo tanto, se puede concluir que los ratios mostrados, determinan la probabilidad de riesgo de colisión entre un camión y una pala minera, permitiendo así cuantificar las aproximaciones críticas en el proceso de carguío.

4.1.2 Determinación de un modelo matemático para establecer distancia mínima entre los equipos intervinientes en el proceso de carguío.

Para determinar el modelo matemático, se diseñó una secuencia de 4 pasos o etapas. En esta sección se describirá el proceso detallado de cómo se relacionó la

información obtenida y cómo se formuló la función matemática. A continuación, se presentarán los detalles de las 4 etapas establecidas:

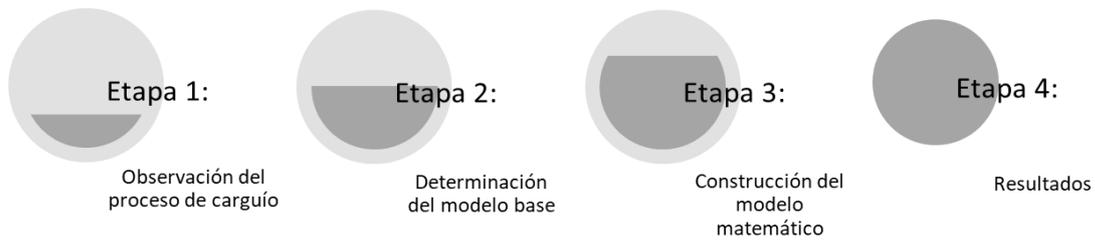


Figura 16. Etapas del modelo matemático.

Nota: Elaboración propia.

- **Etapa 1: Observación del proceso de carguío**

Como primer paso, se llevó a cabo una observación y análisis del proceso de carguío, donde se evaluó la problemática de los camiones mineros, los cuales no tenían definida la distancia mínima de aproximación necesaria para que la pala pudiera descargar el material sin generar daños por colisión. En esta etapa, se identificaron los equipos utilizados para la investigación y las variables que sirvieron como base para el planteamiento del modelo matemático.

Fue crucial identificar la distancia de giro o el radio de movimiento de la pala, medido desde su eje, así como el ancho del camión. Estas distancias nos permitieron establecer parámetros esenciales para el desarrollo de la función matemática.

Como equipo de carguío, se consideró la pala minera 4100XPC Joy Global P&H, la cual tiene la siguiente información sobre sus dimensiones:

Tabla 6.

Dimensiones Pala 4100XPC

DIMENSIONES TOTALES PALA DE MINERÍA 4100XPC – JOY GLOBAL P&H		
A: Ancho	14.4 m	47 ft. 1 in.
B: Longitud	15.0 m	49 ft. 4 in.
C: Altura sobre pórtico	14.7 m	48 ft. 3 in.
D: Ancho de las zapatas de oruga	2210 mm	87 in.
E: Ancho de las orugas (76")	10.2 m	33 ft. 6 in.
F: Longitud de los rastreadores	11.7 m	38 ft. 6 in.
G: Claridad del piso	0.7 m	2 ft. 2 in.
H: Altura: desde el suelo hasta la parte inferior de las losas de contrapeso	3.6 m	11 ft. 10 in.

Nota: Elaboración propia.

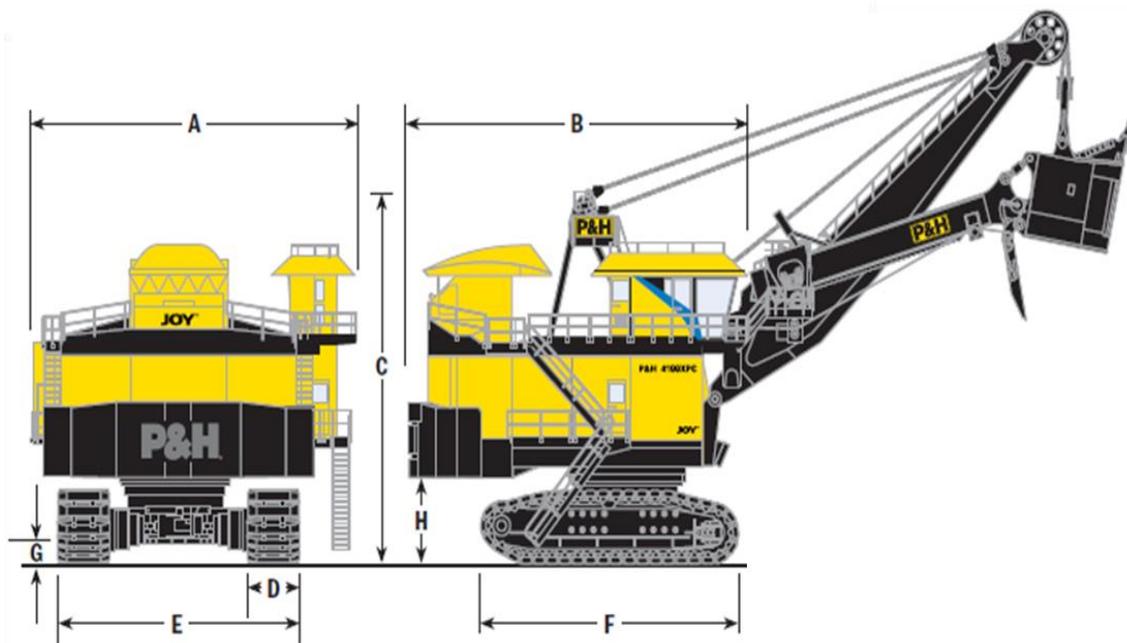


Figura 17. Dimensiones: Pala de minería 4100XPC – Joy Global P&H. Tomada de “Ficha técnica Joy Global P&H” (25).

Como equipo de acarreo, se consideró el camión 797F – Cat, el cual tiene la siguiente información sobre sus dimensiones:

Tabla 7.*Dimensiones Camión 797F*

Dimensiones totales Camión minero 797F – Cat		
1. Altura hasta la parte superior de la ROPS: vacío	6526 mm	21 ft. 5 in.
2. Longitud total de la caja	14802 mm	48 ft. 7 in.
3. Longitud interior de la caja	9976 mm	32 ft. 9 in.
4. Longitud total	15080 mm	49 ft. 6 in.
5. Distancia entre ejes	7195 mm	23 ft. 7 in.
6. Eje trasero a la cola	3944 mm	12 ft. 11 in.
7. Espacio libre sobre el suelo con carga	786 mm	2 ft. 7 in.
8. Espacio libre de descarga	2017 mm	6 ft. 7 in.
9. Altura de carga: vacío	6998 mm	23 ft. 0 in.
10. Profundidad interior de la caja: máxima	3363 mm	11 ft. 0 in.
11. Altura total: caja levantada	15701 mm	51 ft. 6 in.
12. Ancho del neumático delantero de la línea de centro	6534 mm	21 ft. 5 in.
13. Espacio libre del protector del motor: cargado	1025 mm	3 ft. 4 in.
14. Ancho exterior de la caja	9755 mm	32 ft. 0 in.
15. Ancho total del techo	9116 mm	29 ft. 11 in.
16. Ancho interior de la caja	8513 mm	27 ft. 11 in.
17. Altura del techo delantero: vacío	7709 mm	25 ft. 4 in.
18. Espacio libre del eje trasero: cargado	947 mm	3 ft. 1 in.
19. Ancho del neumático doble trasero de la línea de centro	6233 mm	20 ft. 5 in.
20. Ancho total entre neumáticos	9529 mm	31 ft. 3 in.

Nota: Elaboración propia.

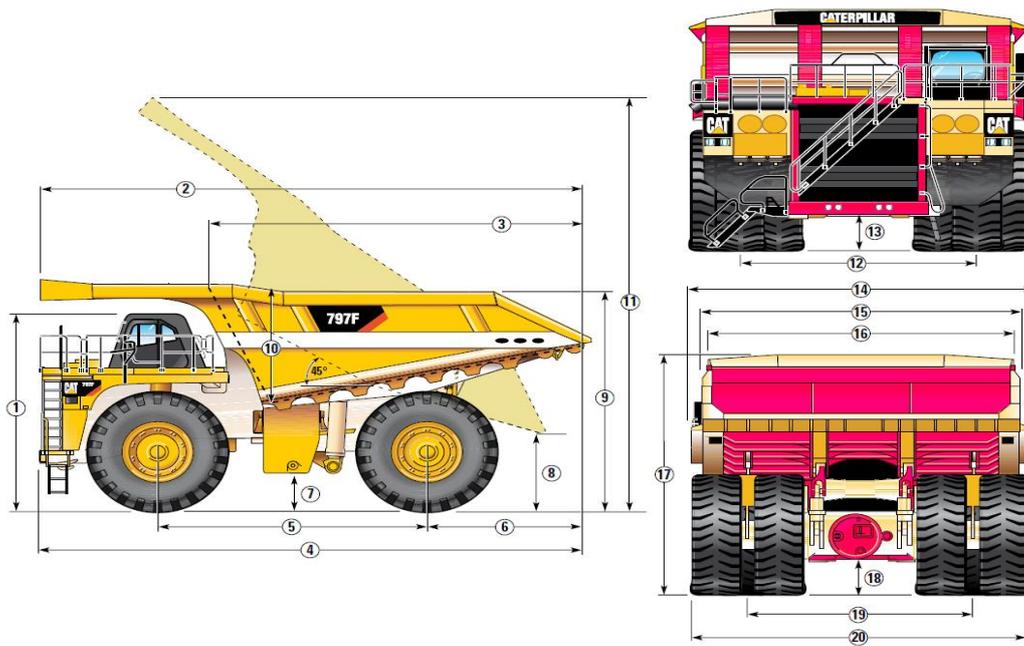


Figura 18. Dimensiones: Camión minero 797F – Cat. Tomada de “Ficha técnica de Caterpillar” (26).

- **Etapa 2: Determinación del modelo base**

Luego de realizar la observación en el proceso de carguío y de identificar las dimensiones de cada equipo, se procedió a elaborar un modelo base o empírico. En este modelo, se plantearon los parámetros de interés y se explicó de manera comprensible la analogía matemática que vincula las variables identificadas en la etapa anterior (problemática). A continuación, se presentan los datos de interés:

- El radio de la pala es de 24 metros, medido desde el eje central del equipo.
- El ancho del camión es de 9.529 metros, considerando la distancia entre neumáticos.

Con esta información se logró identificar la relación entre el radio de operación de la pala y el camión, tomando en cuenta la distancia desde su eje central.

El radio de la pala (longitud, L) y el ancho del camión (A) fueron incorporados en la fórmula para calcular la distancia mínima, lo que permitió formular la primera ecuación.

La siguiente expresión representa la distancia de la pala cuando está en posición de descarga y la del camión cuando está bajo el cucharón.

$$x = \left(L - \frac{A}{2} \right)$$

Entonces, si L = 24 m y A = 9.529 m, el resultado sería x = 19.236 m. Esta distancia es un valor mínimo u objetivo que representa la posición del camión para evitar

daños por colisión con la pala, permitiendo que esta pueda descargar el mineral del cucharón sin dificultad. A la variable “x” la denominaremos “Fj”.

Al determinar la fórmula base, se logró evaluar un primer resultado; sin embargo, la confiabilidad de este resultado aún no abarca toda la problemática. En la siguiente etapa, se realizaron ajustes y se llevó a cabo la construcción del modelo matemático.

- **Etapa 3: Construcción del modelo matemático**

En esta etapa, se construyeron y consolidaron las expresiones matemáticas utilizando una función matemática lineal, describiendo y planteando los parámetros en una expresión matemática.

Para expresar y determinar la función lineal a utilizar, se generó un problema específico, que presenta la siguiente forma:

El camión minero se dirige hacia la pala minera y, en su trayectoria, realiza una maniobra, posicionándose a 19.236 m hacia la izquierda de forma perpendicular con respecto al centro de la pala. Por lo tanto, el camión no necesita desplazarse, ya que está al 100 % de la distancia mínima requerida, es decir, se encuentra en su ubicación correcta.

Entonces, para el planteamiento ante la situación, se define:

$F(x)$ = Distancia objetivo del Camión x porcentaje de aproximación + la distancia de desplazamiento que requiere el Camión.

La expresión matemática se iguala con la función lineal:

$$y = (ax + b)$$

Donde:

- $F(x)$ es igual a “y”, siendo la distancia mínima de aproximación final, (metros).
- “a” es igual a la distancia objetivo del Camión, (metros).
- “x” es igual al porcentaje de aproximación hacia la Pala, (porcentaje %).
- “b” es igual al desplazamiento que necesita el Camión para no colisionar con la Pala, (metros).

Si reemplazamos la función lineal con la fórmula inicialmente planteada, se tendría la siguiente expresión:

$$Distancia = \left(L - \frac{A}{2} \right) \times \%AC + Fj$$

En esta función lineal planteada, la variable “x”, representada como %AC (porcentaje de aproximación crítica), puede tomar valores reales positivos. Al ser porcentual, su rango varía desde 0 % hasta 100 %, teniendo la siguiente expresión:

$$Dom f(x) = \{x \in R / 0\% \leq x \leq 100\%\}$$

A partir del dominio establecido, la función tomaría la siguiente forma:

$$f(0 \%) = (19.236 \text{ m} * 0 \%) + 19.236 \text{ m} = 19.236 \text{ m}$$

Sin embargo, se identificó una debilidad en la fórmula al intentar modificar los porcentajes, lo que generó la necesidad de ajustar la variable “Fj”, denominada constante de desplazamiento. A continuación, se realizó el siguiente análisis.

En la pala se establecieron 4 sectores, y en cada sector se distribuyó proporcionalmente un porcentaje. Es decir, si la distancia objetivo hacia la pala es del 100 %, entonces cada segmento tendrá un valor del 25 %.

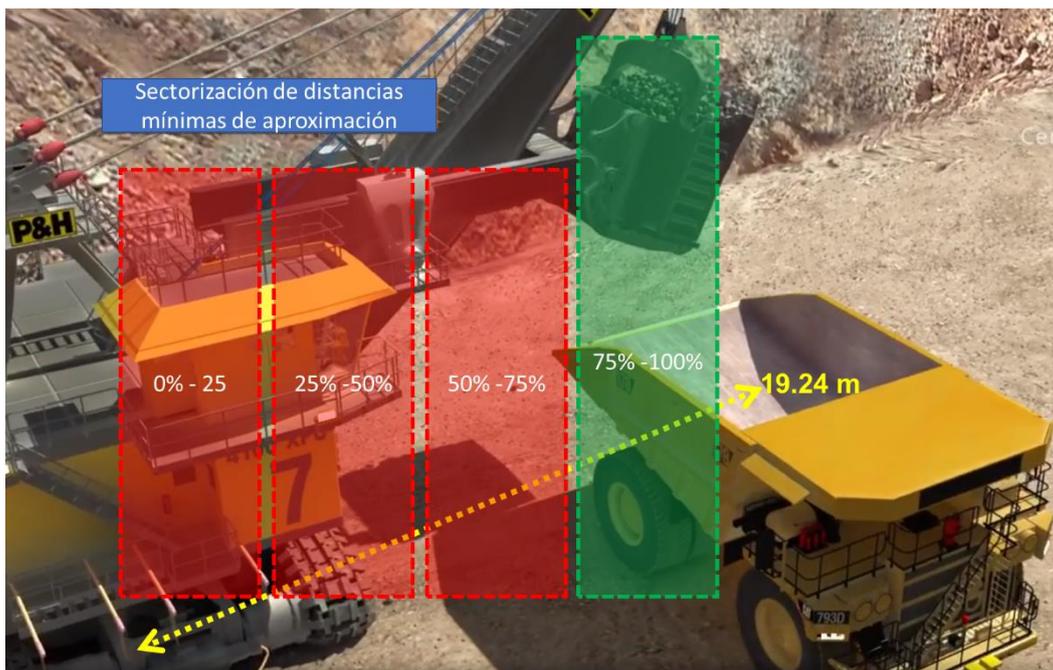


Figura 19. Sectorización Pala - Camión, Elaboración propia.

Entonces, siendo así la variable “Fj” tendría ahora la siguiente expresión:

$$Fj = \left(L - \frac{A}{2} \right) \times 0.25$$

Donde:

- Fj = Constante de desplazamiento Fj, m.
- L = Longitud / radio de movimiento de la Pala, m.
- A= Ancho de Camión minero, m.

Luego de definir la constante “Fj”, se realizó un reajuste con respecto a la sectorización. Es importante entender que el 100 % de la aproximación crítica se considera fuera del radio de riesgo ante una colisión, mientras que un 0 % de aproximación crítica indica que no hay desplazamiento o distancia mínima de seguridad, lo que conlleva un alto riesgo de colisión entre equipos.

Con esta lógica, se incluyó un valor proporcional a los riesgos de colisión, con el siguiente detalle:

- Cuando se tenga un %AC = 0 %, se asignará un valor de 4, lo que representa un riesgo muy alto.
- Cuando se tenga un %AC = 25 %, se asignará un valor de 3, lo que representa un riesgo alto.
- Cuando se tenga un %AC = 50 %, se asignará un valor de 2, lo que representa un riesgo medio.
- Cuando se tenga un %AC = 75 %, se asignará un valor de 1, lo que representa un riesgo bajo.
- Cuando se tenga un %AC = 100 %, se asignará un valor de 0, lo que representa un riesgo nulo.

Lo expresado líneas arriba se resume en la siguiente tabla:

Tabla 8.

Clasificación del riesgo

Clasificación del riesgo	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Nulo
%AC	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Valor del Riesgo	4	3	2	1	0

Nota: Elaboración propia.

Finalmente, la expresión del modelo matemático para calcular la distancia mínima de aproximación se formuló de la siguiente manera, considerando que la variable “Fj”, tras el reajuste, tomó la siguiente forma “FFj”

$$Distancia = \left(L - \frac{A}{2} \right) \times \%AC + FFj$$

- % AC = Porcentaje de aproximación crítica hacia la Pala, %.
- FFj = Factor corrección de la constante Fj, m.

- **Etapa 4: Resultados**

Se aplicó la ecuación formulada teóricamente en el paso anterior para evaluar los resultados y proponer soluciones.

El modelo desarrollado es aplicable a cualquier tipo de pala y camión minero, siempre que se cuente con dos parámetros clave: el radio de giro de la pala y el ancho del camión.

En esta parte, se generó un escenario en el que un camión minero ingresa para recibir material de la pala. En la siguiente figura se mostrarán la sectorización y las dimensiones de la pala y el camión, donde se han determinado los siguientes datos:

- L = Longitud / radio de movimiento de la Pala = 24 metros
- A= Ancho de Camión minero = 9.529 metros

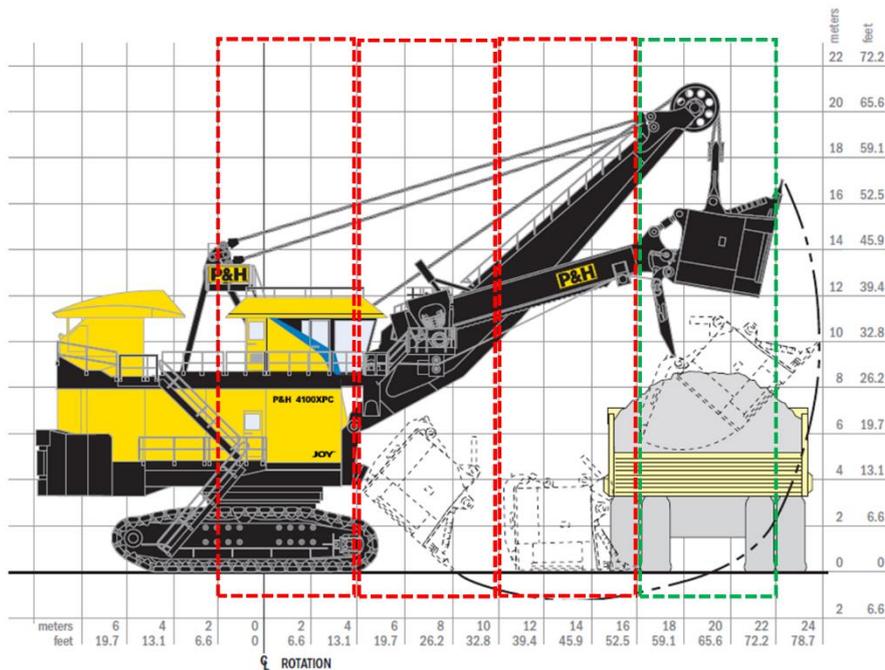


Figura 20. Modelado Pala - Camión, Elaboración propia.

Luego de identificar los datos base, se realizará el cálculo de la constante Fj, obteniendo el siguiente resultado:

$$F_j = 24 \text{ m} - (9.529 \text{ m} / 2) \times 0.25 = \mathbf{4.809 \text{ metros}}$$

Una vez calculada la constante de desplazamiento “Fj”, se realizará el ajuste de acuerdo con el valor de riesgo (VR), obteniendo así el factor de corrección “FFj”, que se especifica en la tabla a continuación:

Tabla 9.*Cálculo factor de corrección de la constante Fj*

VR	FFJ
4	19.24
3	14.43
2	9.62
1	4.81
0	0

Nota: Elaboración propia.

Con el factor de corrección “FFj” ya calculado, se procedió a calcular la distancia mínima de aproximación, considerando el porcentaje de aproximación crítica (%AC). Los resultados de estos cálculos son los siguientes:

Tabla 10.*Cálculo de la distancia mínima de aproximación*

%AC	Distancia del Camión con respecto a la Pala (entre ejes)	Distancia mínima objetivo
0 %	0	19.24 metros
25 %	4.81	19.24 metros
50 %	9.62	19.24 metros
75 %	14.43	19.24 metros
100 %	19.24	19.24 metros

Nota: Elaboración propia.

Como se puede evidenciar, la fórmula permite calcular la distancia mínima para diferentes posiciones, determinando así la distancia que debe desplazarse el camión para realizar la maniobra de descarga de la pala de forma segura, evitando colisiones entre equipos mineros.

Como parte fundamental de este estudio de investigación y del modelo matemático propuesto, se estableció un ciclo de mejora y consistencia, con el objetivo de implementar mejoras en el trabajo desarrollado en el campo.

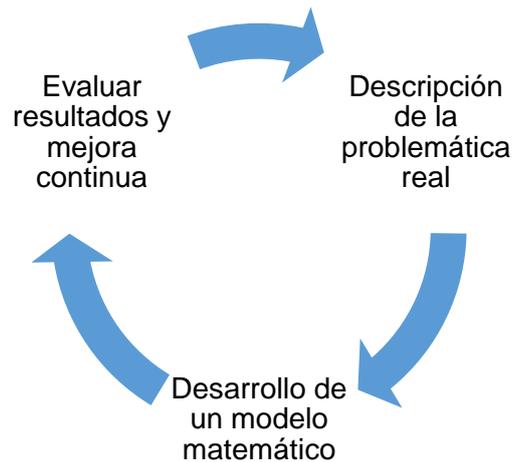


Figura 21. Ciclo de mejora y consistencia, Elaboración propia.

El ciclo de mejora y consistencia está alineado con el modelo de Edward Deming, conocido por su enfoque en la mejora continua, fundamentado en cuatro pilares: planificar, hacer, verificar y actuar.

Como principio central de este estudio, el ciclo de mejora continua se integra con el objetivo general de optimizar el proceso de carguío. Su aplicación se desarrolló de la siguiente manera:

Planificar: Se realizó la identificación y formulación del problema, detectando desviaciones y estableciendo objetivos y justificaciones. Se planteó una hipótesis, se revisaron antecedentes de proyectos previos, se estructuraron las bases teóricas y se definieron el método y el alcance.

Hacer: Se llevó a cabo una interacción en el campo, implementando lo planificado y recopilando información en terreno. Paralelamente, se desarrolló un modelo matemático para calcular la distancia de seguridad entre la pala y el camión.

Verificar: En esta fase, se revisaron las ecuaciones empíricas formuladas inicialmente. Durante esta revisión, se identificaron varias brechas y oportunidades de mejora.

Actuar: Se ajustó la ecuación para establecer la distancia segura entre el camión y la pala minera.

Este proceso contribuye de manera significativa a los objetivos de cualquier organización, y la fórmula matemática desarrollada es aplicable y susceptible de ser mejorada continuamente en la operación unitaria de carguío.

El modelo de mejora continua se puede esquematizar de la siguiente manera:

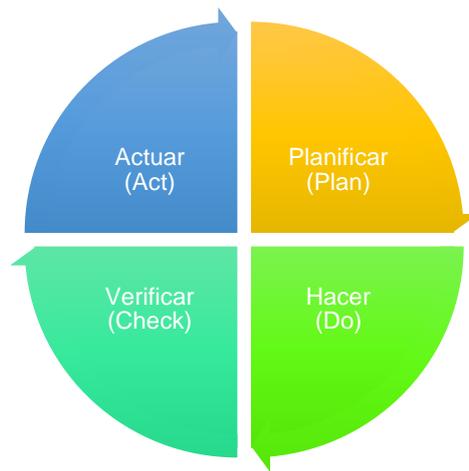


Figura 22. Ciclo de mejora continua, Tomada de “Círculo de la mejora continua” (33).

4.1.3 Evaluación de resultados obtenidos en el contexto de productividad y su impacto económico en el proceso de carguío

Cuando se planifica una operación minera mecanizada, es crucial calcular la cantidad de equipos de acuerdo con el plan de minado proyectado.

Como primer paso, se debe calcular la producción, la cual se basa en datos reales obtenidos de una operación minera a tajo abierto. Es importante entender que la productividad puede calcularse de forma teórica, pero luego debe ajustarse y compararse con datos reales.

En primer lugar, se calculará el tiempo del ciclo de la pala (Cm), el cual debe considerar el tiempo de excavación, el giro con carga, la descarga, el giro sin carga y el posicionamiento. Se realizó un seguimiento del tiempo en campo a una pala modelo 4100XPC en 5 ocasiones distintas, durante las cuales se cargaron entre 2 y 3 camiones, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 11.

Estudio de tiempo de Pala 4100XPC

Tiempos de movimiento de Pala	
Tiempo excavación	12 seg
Tiempo de giro (con carga)	11 seg
Tiempo de descarga	4 seg
Tiempo de retorno al banco (sin carga)	8 seg
Tiempo de posicionamiento	4 seg
Total	39 seg

Nota: Elaboración propia.

Para la pala 4100XPC, se ha considerado un tiempo de movimiento de 39 segundos, con un factor de conversión de 1.5 debido a que la condición de vertido es difícil y la profundidad de excavación está por encima del 75 %. La capacidad del cucharón SAE 2:1 de la pala oscila entre 74.4 y 88.4 yd³. El factor de llenado se establece en 0.9, ya que se trata de un cargado de roca de voladura en condiciones difíciles. La eficiencia de trabajo es promedio, con un valor de 0.8, y la densidad del material es de 1960 kg/m³, considerando que el material presenta un promedio del 25 % de tierra y el 75 % de roca. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 12.

Productividad de Pala 4100XPC

Cálculo de productividad de la Pala	
Tiempo de movimiento de la Pala	39 Segundos
Factor de conversión	1.5
Tiempo de ciclo de la Pala (Cm)	58.5 Segundos
Capacidad del cucharón (q1)	81.4 yd ³
Factor de llenado del cucharón (k)	0.9 Condición difícil, Cargando roca bien volada.
Producción por ciclo (q)	73.26 yd ³
Eficiencia del trabajo (E)	0.8 Condición promedio.
Valor producción horaria	3600
Producción horaria (Q)	3606.64615 yd³ / hr
Factor de conversión (yd ³ a m ³)	0.764555 m ³
Producción horaria (Q) (volumen)	2757.47935 m ³ /hr
Densidad del material	1960 kg/m ³
Producción horaria (Q) (masa)	5404659.53 Kg / hr
Factor de conversión (kg a TM)	0.001 Ton
Productividad	5404.65953 Ton / hr

Nota: Elaboración propia,

A continuación, se calcula la cantidad de ciclos de la pala necesarios para cargar un camión minero, obteniendo el siguiente valor:

Tabla 13.

Ciclo de Pala 4100XPC

Cálculo de ciclo por Pala Minera	
Capacidad del Camión colmado C1	253.50 m ³
Capacidad del cucharón (q1)	62.95 m ³
Factor de llenado del cucharón (k)	1.1 Mezcla de roca y tierra
Ciclos requeridos por Pala para cargar Camión	3.66 Ciclos
	4 Ciclos

Nota: Elaboración propia.

El ciclo del camión minero presenta varias condiciones que son necesarias para calcular la resistencia total en el ciclo de acarreo, así como la velocidad máxima, la velocidad promedio y, finalmente, el tiempo del ciclo.

En la siguiente imagen se describen las distancias y pendientes del terreno del ciclo regular del camión:

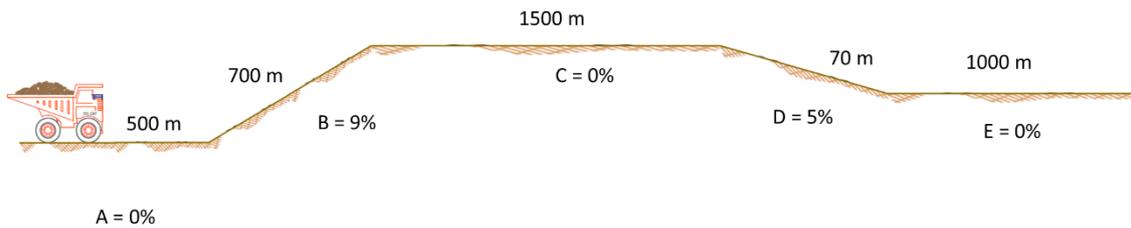


Figura 23. Ciclo regular del Camión 797F, Elaboración propia.

En la siguiente tabla se calcula el tiempo del ciclo de acarreo del camión minero, considerando tanto su trayecto cargado como vacío:

Tabla 14.*Ciclo de acarreo regular del Camión 797F*

Tiempos de ciclo									
Camión cargado	Distancia	% Resistencia pendiente	% Resistencia rodadura	Resistencia total	Camión	Velocidad máxima (km/hr)	Factor (altura)	Velocidad promedio (m/min)	Tiempo (min)
Plano A	500	0 %	8 %	8.00 %	3D	17	0.8365	237.01	2.11
Subida B	700	9 %	1.70 %	10.70 %	2D	13	0.8365	181.24	3.86
Plano C	1500	0 %	1.70 %	1.70 %	7D	65	0.8365	906.21	1.66
Bajada D	70	-5 %	1.70 %	3.30 %	6D	41	0.8365	571.61	0.12
Plano E	1000	0 %	14 %	14.00 %	1D	10	0.8365	139.42	7.17
								Total	14.92
Camión vacío									
Plano E	1000	0 %	14 %	14.00 %	4D	24	0.8365	334.60	2.99
Subida D	70	5 %	1.70 %	6.70 %	7D	64	0.8365	892.27	0.08
Plano C	1500	0 %	1.70 %	1.70 %	7D	68	0.8365	948.03	1.58
Bajada B	700	-9 %	1.70 %	7.30 %	5D	28	0.8365	390.37	1.79
Plano A	500	0 %	8 %	8.00 %	6D	45	0.8365	627.38	0.80
								Total	7.24

Nota: Elaboración propia,

En la siguiente tabla se presenta el cálculo del tiempo del ciclo de acarreo del camión minero final:

Tabla 15.

Ciclo de acarreo final del Camión 797F

Cálculo de tiempo por ciclo de Camión	
Ciclos de la Pala (n)	4 Ciclos
Tiempo de ciclo de la Pala (Cms)	0.98 min
Tiempo de acarreo (D/v1)	14.92 min
Tiempo de descarga del Camión (t1)	0.6 min
Tiempo de retorno (D/v2)	7.24 min
Tiempo de carguío del Camión (t2)	0.45 min
Tiempo necesario para la carga del primer pase (ts)	0.22 min
Tiempo de ciclo de Camión (Cmt)	26.35 min / ciclo

Nota: Elaboración propia.

Para el camión CAT 797F, se ha considerado una eficacia de trabajo del 0.8, dado que se trata de una condición promedio. La capacidad promedio del camión colmatado es de 253.5 m³ y la densidad del material es de 1960 kg/m³, considerando que el material presenta un promedio del 25 % de tierra y 75 % de roca. A continuación, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 16.

Productividad del Camión 797F

Cálculo de productividad del Camión	
Eficiencia de trabajo del Camión (Et)	0.8
Número de Camiones en operación (M)	1 Camión
Producción por ciclo (C)	253.50 m ³
Producción horaria (P)	461.7227232 m³ / hr
Densidad	1960 kg/m ³
Masa	904976.5374 Kg / hr
Conversor	0.001 Ton
Productividad	904.9765374 Ton / hr

Nota: Elaboración propia

En esta etapa, se realizará un análisis del lucro cesante que impactaría a una empresa del sector minero. Este análisis se plantea en un escenario donde un camión minero, al no identificar la distancia mínima de aproximación, colisiona contra la pala minera. Aunque no se registraron lesiones personales, sí se produjeron daños considerables en la estructura de ambos equipos.

Al identificar y reportar los daños generados por la colisión, se ha determinado que ambos equipos deberán detenerse durante un tiempo de 24 horas para realizar un mantenimiento correctivo. A continuación, se detallará la utilidad perdida de la pala y del camión minero durante este período de 24 horas:

En el caso de la pala 4100XPC, se ha considerado un porcentaje de utilización y disponibilidad del 89 %, una ley de cabeza del 0.46 %, una recuperación metalúrgica del 86 %, así como el precio y costo del cobre según el mercado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 17.

Utilidad perdida por detener una Pala 4100XPC

Cálculo de utilidad perdida		
Día	1.0	Días
Utilización	89 %	Hr
Disponibilidad	89 %	Hr
Horas	19.0	Hr
Productividad	5,405	TMS/hr
Mineral a chancado primario	102,745	TMS
Ley de cabeza Cu	0.46 %	
Recuperación Metalúrgica	86 %	
Cu fino	404.1	TM
Libras de Cu	890,626	lb
Precio lb-Cu	4.258	US\$/lb
Costo	2.00	US\$/lb
Utilidad Perdida	2,010,765	US\$

Nota: Elaboración propia.

En el caso del camión 797F, se ha considerado un porcentaje de utilización y disponibilidad del 89 %, una ley de cabeza del 0.46 %, una recuperación metalúrgica del 86 %, así como el precio y costo del cobre según el mercado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 18.*Utilidad perdida por detener un Camión 797F*

Cálculo de utilidad perdida		
Día	1.0	Días
Utilización	89 %	Hr
Disponibilidad	89 %	Hr
Horas	19.0	Hr
Productividad	905	TMS/hr
Mineral a chancado primario	17,204	TMS
Ley de cabeza Cu	0.46 %	
Recuperación Metalúrgica	86 %	
Cu fino	67.7	TM
Libras de Cu	149,130	lb
Precio lb-Cu	4.258	US\$/lb
Costo	1.6	US\$/lb
Utilidad Perdida	396,342	US\$

Nota: Elaboración propia.

En este análisis, se puede interpretar que la utilidad perdida por la pala detenida sería de US\$ 2,010,765, mientras que la utilidad perdida por el camión detenido ascendería a US\$ 396,342. Esto suma un total de US\$ 2,407,107, lo que representa una pérdida significativa para la empresa.

Continuando con la simulación y utilizando la información sobre las aproximaciones críticas, se asumirá un tiempo de detención de 3 horas en el proceso de carguío, considerando ambos equipos (pala y camión minero). Se calculará la utilidad perdida por hora de la pala y del camión, y de esta manera se estimará la utilidad perdida (lucro cesante) derivada de las aproximaciones críticas durante un periodo anual, obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 19.*Lucro cesante por aproximaciones críticas*

	Aproximaciones críticas	Horas de equipo parado	Utilidad calculada Pala / Hora	Utilidad calculada Camión / Hora	Utilidad perdida por aproximación crítica
Ene	5	15	105,830	20,860	1,900,347.78
Feb	6	18	105,830	20,860	2,280,417.34
Mar	10	30	105,830	20,860	3,800,695.57
Abr	8	24	105,830	20,860	3,040,556.46
May	10	30	105,830	20,860	3,800,695.57
Jun	8	24	105,830	20,860	3,040,556.46
Jul	5	15	105,830	20,860	1,900,347.78
Ago	10	30	105,830	20,860	3,800,695.57
Set	9	27	105,830	20,860	3,420,626.01
Oct	11	33	105,830	20,860	4,180,765.13
Nov	9	27	105,830	20,860	3,420,626.01
Dic	14	42	105,830	20,860	5,320,973.80
Total:	105	315			39,907,303.48

Nota: Elaboración propia,

Por esta razón, el modelo matemático propuesto reduciría significativamente el riesgo de colisión entre los equipos en el proceso de carguío, evitando demoras que podrían cuantificarse en hasta US\$ 39,907,303.48 al año.

Finalmente, en este trabajo se estableció una línea base utilizando datos informáticos del año 2022. En 2023, se registró evidencia en campo que mostró una variabilidad en las distancias, con un promedio de 17 metros entre la pala y el camión minero durante el proceso de carguío. Esta situación podría haber generado daños por colisión, resultando en un lucro cesante estimado de US\$ 39,907,303.48.

Tras la implementación del modelo matemático, se estableció una distancia mínima de aproximación de 19.24 metros, lo que optimiza el proceso de carguío y asegura una productividad de 5,404 ton/hr para la pala y 904 ton/hr para el camión. Este avance no solo mejora la productividad de la mina, sino que también incrementa la seguridad de los operadores al reducir la probabilidad de accidentes y disminuye los costos operativos.

CONCLUSIONES

En correlación con el objetivo general y específicos se concluye:

- El análisis de las aproximaciones críticas de equipos en el proceso de carguío ha mostrado que los ratios de aproximación crítica (AC) varían considerablemente, en particular se observó que el ratio alcanzó su punto máximo en el mes de diciembre con un valor de 0.8. Este hallazgo indica un aumento considerable del riesgo de accidentes en ese periodo.
- A partir del análisis y diseño de las variables identificadas, se logró desarrollar un modelo matemático basado en una función lineal para calcular la distancia mínima de aproximación de equipos en el proceso de carguío. Este modelo matemático además de cumplir con el objetivo de establecer distancias mínimas necesarias para asegurar una operación segura y eficiente también logró ser aplicable en la práctica operativa, el cual permite optimizar el uso de equipos en el proceso de carguío y reducir el riesgo de accidentes asociados con distancias inadecuadas.
- Los resultados obtenidos en la muestra indican que se ha logrado una reducción significativa en el riesgo de colisión entre la pala y el camión minero. Esta mejora tiene un impacto económico positivo, evitando un posible lucro cesante estimado en US\$ 39,907,303.48, es decir, contribuye de forma positiva y directamente en la productividad y seguridad del proceso de carguío al minimizar las interrupciones y costos asociados.
- Finalmente, los resultados obtenidos han permitido desarrollar un modelo matemático efectivo para calcular la distancia óptima de aproximación entre palas y camiones mineros. Este modelo logra optimizar la productividad del proceso de carguío, el cual es aplicable para diferentes modelos de palas y camiones.

RECOMENDACIONES

En función del estudio, se tiene las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda complementar con capacitación y entrenamiento a los operadores de camiones y palas mineras en cuanto a los procedimientos y métodos en el proceso de carguío, a fin de reducir las aproximaciones críticas.
- Se recomienda implementar sistemas tecnológicos que permita aplicar el modelo matemático de forma automática y simple para los operadores de camiones y palas mineras.
- Se recomienda realizar un análisis económico y de productividad el cual permita identificar y cuantificar el potencial de pérdida de lucro cesante en caso se genere un accidente por colisión entre camión y pala minera.
- Finalmente, se recomienda aplicar el modelo matemático desarrollado, con la finalidad de mejorar la productividad del proceso de carguío, una condición de trabajo más segura y eficiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TENA, M. Diseño y desarrollo de un sistema anticolidión con sensores de proximidad sin contacto. Proyecto fin de carrera (Ingeniería de Sistemas y Automática) España: Universidad Carlos III de Madrid, 2011. 157 pp. [fecha de consulta: 19 de enero de 2023]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/13558>
2. NAVA, M, et al. Sistemas de Anticolidión para la Industria Minera. [En línea]. Marzo 2017, 11-18 [fecha de consulta: 17 de enero de 2023]. ISSN-2531-2952. Disponible en: https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Computo_Aplicado/vol1num1/Revista_de_Computo_Aplicado_V1_N1_2.pdf
3. AGUDELO, D., SILVA, J. y GIL, J. Estimación de la Localización de un Vehículo Usando un Sistema de Visión por Computador. Tesis (Título de Ingeniero de Sistemas y Computación). Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2013. 167 pp. [Fecha de consulta: 05 de enero de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/browse/author?scope=fdc715e7-39e4-4a2b-a6fe-25a72e4f1b40&value=Agudelo%20Espa%C3%B1a,%20Diego%20Alejandro>
4. IBARRA, M., et al. Detección de Vehículos Basada en Visión por Computador para Sistema de Ayuda a la Conducción en Tráfico Urbano. Generación de hipótesis. Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas [En línea]. 2016, 1108 - 1115 [fecha de consulta: 28 de enero de 2023]. doi.org/10.17979/spudc.9788497498081.1108. Disponible en: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498081.1108>
5. ACEVEDO, R., et al. Sistema móvil de detección de colisión temprana Mobile early collision detection system. Ingeniería de Software [En línea]. Diciembre, 2019, 52-55 [Fecha de consulta: 02 de enero de 2023]. doi.org/10.33412/rev-ric.v5.2.2504. Disponible en: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.2.2504>
6. CORTES, J. Implementación de herramientas tecnológicas y sistemas de información en el departamento de seguridad industrial para evitar la ocurrencia de incidentes en la empresa Carbones del Cerrejón Limited. Tesis (Título de Ingeniero Electrónico). Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2012. 77 pp. [Fecha de consulta: 08 de enero de 2023]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2008?show=full>
7. MONTALVO, V. Sistema de maniobras anticolidión en automóviles eléctricos con base en percepción LiDAR y perfiles de velocidad. Tesis (Título de Maestro en

- Ciencias). México: Universidad Autónoma de Querétaro, 2023. 93 pp. [fecha de consulta: 19 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/xmlui/handle/123456789/7831?locale-attribute=en>
8. LEÓN, P. Diseño de una Antena de Bajo Perfil para un Sistema Anticolisión Embarcado. Tesis (Título de Ingeniero de Sistemas de Comunicaciones). España: Universidad Carlos III de Madrid, 2014. 85 pp. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/26219>
 9. CARRASCO, F. Sistema Anticolisión de Grúas Torre. Tesis (Título en Tecnologías Industriales). España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2018. 137 pp. [Fecha de consulta: 07 de enero de 2023]. Disponible en: https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/6489/chirinos_prdr.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 10. CABRERA, J. y MANOSALVA, J. Evaluación de Sistemas Inteligentes para la Disminución de Accidentes en Intersecciones Vehiculares. Informe (Trabajo de Especialización en Telecomunicaciones Inalámbricas). Colombia: Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, 2016. 36 pp. Disponible en: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/2204>
 11. AMAU, G. Optimización de equipos de carguío y transporte para el incremento de producción en la CIA. Minera Antapaccay Espinar – Cusco. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2019. 134 pp. [Fecha de consulta: 03 de enero de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/4644>
 12. SÁNCHEZ, I. y TOMASTO, N. Tecnología RFID aplicada al control de camiones de carga en el proceso de carguío y transporte en minería. Tesis (Título de Ingeniero de Sistemas). Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2009. 120 pp. [fecha de consulta: 07 de enero de 2023]. Disponible en: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/15287>
 13. CUTIPA, R. y MENDOZA, J. Análisis de la Implementación de Cámaras en camiones para la reducción del Índice de Accidentabilidad en el transporte de mineral concentrado en la empresa SERVOSA SAC Arequipa 2020. Tesis (Título de Ingeniero de Seguridad Industrial y Minera). Perú: Universidad Tecnológica del Perú, 2021. 184 pp. [Fecha de consulta: 11 de enero de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4371>
 14. HERRERA, J. Introducción a la Minería (Vol. 1) Conceptos, Tecnologías y Procesos. [En línea]. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2017 [fecha de consulta: 24 de junio de 2023]. Disponible en:

- https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf
15. Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. El Ciclo Productivo de la Minería. 2024 [fecha de consulta: 24 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/temas-de-interes/4766-ciclo-productivo-de-la-mineria.html>
 16. LÓPEZ, C. Manual de Minería a Cielo Abierto [en línea]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2022 [fecha de consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en:
https://issuu.com/ingecominas.es/docs/manual_mineria_a_cielo_abierto_extracto_
 17. Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. Antapaccay extendería su vida útil hasta el 2043. 2022 [fecha de consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://www.desdeadentro.pe/2022/02/antapaccay-extenderia-su-vida-util-hasta-el-2043/>
 18. HERRERA, J. Método de minería a cielo abierto. [En línea]. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2006 [fecha de consulta: 10 de enero de 2023]. Disponible en:
https://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO_2.pdf
 19. HERRERA, J. Concepción, diseño e ingeniería de un proyecto en minería, [en línea]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2018. [fecha de consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en: https://oa.upm.es/70259/3/Concepcion-Diseno-Ingenieria_Proyecto_DPMB1T1_R0-20181005.pdf
 20. HERRERA, J. Introducción a la Minería Subterránea (Vol. 1) Características generales. [En línea]. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2019 [fecha de consulta: 26 de junio de 2023]. Disponible en: https://oa.upm.es/62723/1/CARACT_MINERIA_INTERIOR_LM1B4T1R0-20191114.pdf
 21. Minería Chilena. Grandes camiones y palas: Un match que apunta a mayor rendimiento. 2023 [fecha de consulta: 31 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/grandes-camiones-y-palas-un-match-que-apunta-a-mayor-rendimiento/#>
 22. CARHUAVILCA, C. Alcances de la norma técnica: “elementos para determinar costo horario de los equipos y maquinaria en el sector de construcción”. [En línea]. En: Resolución Directoral N°035-2010. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, (2010: Perú). Panel [Fecha de consulta: 06 de enero de 2023]. Disponible en:

<https://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2011/cajamarca/costo%20horario%20de%20maquinaria.pdf>

23. ASARCO. Tiempos e Indicadores Clave. Distribución de tiempos e indicadores claves. Chile: ASARCO, 2005.
24. KOMATSU, Ficha técnica de pala eléctrica de cable P&H 41001XPC [en línea]. 2019 [fecha de consulta: 02 de noviembre de 2023]. Disponible en: <https://mining.komatsu/es/product-details/p-h-4100xpc>
25. CAT, Ficha técnica de camiones para minería 797F [en línea]. 2023 [fecha de consulta: 02 de noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html
26. BOCCO, M. Funciones elementales para construir modelos matemáticos, [en línea]. Buenos Aires: Instituto nacional de educación tecnológica, 2010. [fecha de consulta: 01 de noviembre de 2023]. Disponible en: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001843.pdf>
27. TRAJANO, A. aritmética progressiva, [en línea]. Rio de Janeiro: Editorial 1948. [fecha de consulta: 02 de noviembre de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/104079>
28. TIBURCIO, J. Organización matemática de la función lineal y Función afín en un libro de texto de segundo Año de educación secundaria. Tesis (Magister en Enseñanza de las Matemáticas). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017, 126 pp [fecha de consulta: 02 de noviembre de 2023]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9444/TIBURCIO_RIVAS_JOSE_FUNCION_LINEAL_LIBRO_DE%20_TEXTO_1.pdf?sequence=6&isAllowed=y
29. VIVANCO, R. Mayor Productividad con una Mejor Calidad en los Costos. [En línea]. México: Universidad Tecnológica Americana, 1995 [fecha de consulta: 12 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3430/3430>
30. GARCÍA, J. Configuración, prueba y cuantificación del lucro cesante. [En línea]. Diciembre 2019, 190-191 [fecha de consulta: 12 de diciembre de 2023]. ISSN-2224-4131. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7075618>
31. D.S. N.º 024-2016-EM. Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería. Diario oficial El Peruano, Lima, Peru, 28 de julio de 2016.
32. HERNANDEZ, R., FERNANDEZ, C. y BAPTISTA, P. Metodología de la investigación [en línea]. México: Mc Graw W-Hill interamericana editores, 2014

[fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. Disponible en:
[https://www.esup.edu.pe/wp-](https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-)

[content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Methodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf](https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Methodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf)

33. MARTOS, A. Círculo de la mejora continua. Fundación Internacional para la Mejora Continua. [En línea] Enero, 2021. [Fecha de consulta 24 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.funimec.org/repositorio/repositorio/circulo-mejora-continua.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 20.

Matriz de consistencia:

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	
Problema General	Objetivo general	Hipótesis general	Independiente	Dependiente
¿Cómo se podrá desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos, de manera que se optimice el proceso de carguío en una mina a tajo abierto?	Desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos con el propósito de optimizar el proceso de carguío en una mina a tajo abierto.	Se puede desarrollar un modelo matemático para determinar la distancia mínima de aproximación de equipos que permita optimizar el proceso de carguío en una mina a tajo abierto.	Distancia de aproximación de equipos en el proceso de carguío.	Productividad de equipos en el proceso de carguío.
Problemas específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis específicas		
¿Se podrá analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso de carguío?	Analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso actual de carguío.	Se puede analizar las aproximaciones críticas entre equipos en el proceso de carguío.		
¿Se podrá determinar un modelo matemático para establecer la distancia mínima de equipos en el proceso de carguío?	Determinar un modelo matemático que establezca la distancia mínima de aproximación entre equipos en el proceso de carguío.	Con un modelo matemático se podrá determinar la distancia mínima de equipos en el proceso de carguío.		
¿Cuáles serían las mejoras al aplicar el modelo matemático en la determinación de distancia mínima de equipos en el proceso de carguío?	Evaluar los resultados en el contexto de la productividad y su impacto económico en el proceso de carguío.	Los resultados mejorarán la productividad de los equipos y evitarán un impacto económico negativo en el proceso de carguío.		

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 2

Tabla 21.

Reporte de incidentes 2022

Título Incidente	Descripción Incidente	Fecha del Suceso	Hora del Suceso	Turno	Lugar	Sub-Ubicación	Tipo Incidente	Act Relacionada	Grupo de Riesgo	Riesgo
Otras	Cuasi daño a la propiedad: camión no espera a pala y luego ingresa casi chocando	10/12/2022	07:00	Noche	Mina	Operaciones Mina	Cuasi-Accidente	Operación de equipó pesado	Grupo 01 – Vehículos y Equipos Móviles - En sitio	Vehículo, equipo móvil e interacciones peatonales en el sitio, incluso bajo tierra
Otras	Cuasi daño a la propiedad: Camión ingresa y choca con pala por falta de espacio	13/12/2022	11:15	Noche	Mina	Operaciones Mina	Cuasi-Accidente	Operación de equipó pesado	Grupo 01 – Vehículos y Equipos Móviles - En sitio	Vehículo, equipo móvil e interacciones peatonales en el sitio, incluso bajo tierra
Otras	Cuasi daño a la propiedad: Pala se mueve sin ver a camión mal posicionado	10/12/2022	09:45	Noche	Mina	Operaciones Mina	Cuasi-Accidente	Operación de equipó pesado	Grupo 01 – Vehículos y Equipos Móviles - En sitio	Vehículo, equipo móvil e interacciones peatonales en el sitio, incluso bajo tierra
Otras	Cuasi daño a la propiedad: Camión ingresa cerca a la pala	21/12/2022	11:06	Noche	Mina	Operaciones Mina	Cuasi-Accidente	Operación de equipó pesado	Grupo 01 – Vehículos y Equipos Móviles - En sitio	Vehículo, equipo móvil e interacciones peatonales en el sitio, incluso bajo tierra
Otras	Cuasi daño a la propiedad: Camión roza a la pala que estaba en movimiento	13/12/2022	03:32	Noche	Mina	Operaciones Mina	Cuasi-Accidente	Operación de equipó pesado	Grupo 01 – Vehículos y Equipos Móviles - En sitio	Vehículo, equipo móvil e interacciones peatonales en el sitio, incluso bajo tierra

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 3

DISTANCIA MINIMA DE APROXIMACION CAMION - PALA

$$Distancia = \left(L - \frac{A}{2} \right) \times \%AC + FFJ$$

Datos / calculo constante Fj	
L: (longitud)	24
A: (ancho)	9.529
Fj: (constante)	4.809
$Fj = \left(L - \frac{A}{2} \right) \times 0.25$	

Detalle de la formula de FJ	
✓	Fj = Constante de desplazamiento Fj
✓	L = longitud / radio de movimiento de la pala
✓	A= Ancho de camion minero
✓	% AC = Porcentaje de acercamiento critico hacia la pala
✓	FFJ = Factor correccion de la constante Fj
✓	Distancia minima de aproximación

Cálculo de distancia mínima de aproximación					
VR	FFJ	%AC	Distancia del camion con respecto a la pala (entré ejes)	Distancia mínima	
4	19.24	0%	0.00	19.24	m
3	14.43	25%	4.81	19.24	m
2	9.62	50%	9.62	19.24	m
1	4.81	75%	14.43	19.24	m
0	0.00	100%	19.24	19.24	m

✓
x

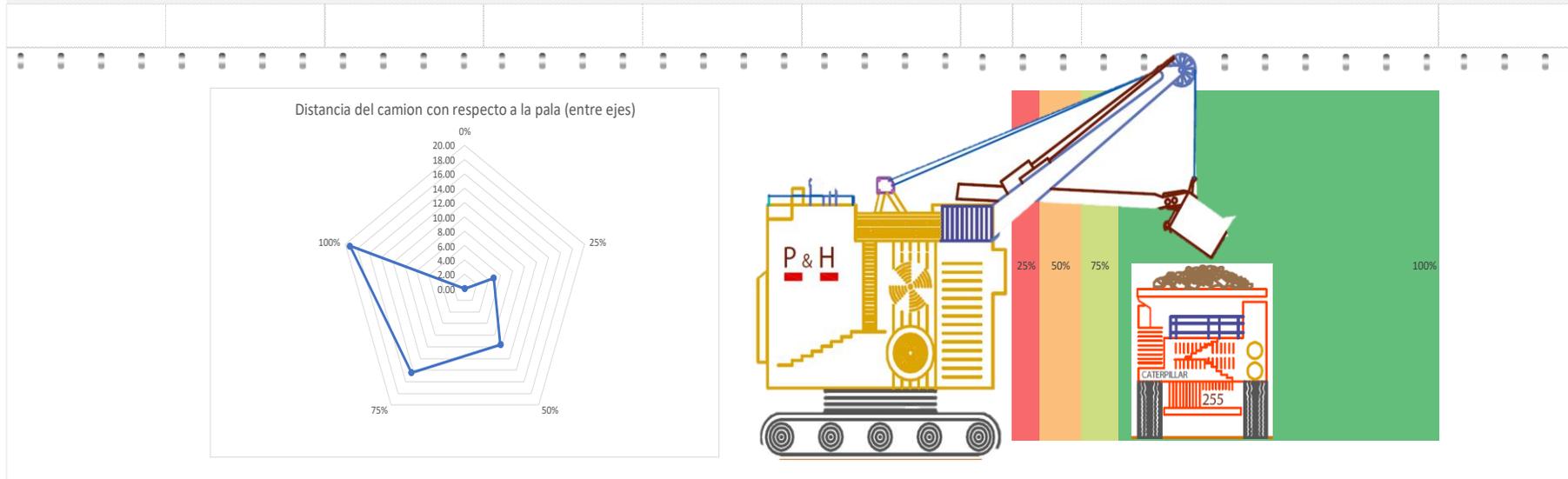


Figura 24. Dashboard del cálculo de distancia mínima de aproximación
Nota: Elaboración propia.

ANEXO 4

Tabla 22.

Formato de Encuesta

Formato de Encuesta	
Nombre operador:	
0 Mencione el tipo de equipo móvil que utiliza:	Detallar:
1 ¿Usted ha identificado puntos ciegos cuando la pala está girando / cuando el camión está retrocediendo o avanzando?	Si No
2 ¿Tiene alguna referencia donde ubicarse cuando el camión está retrocediendo / cuando gira la pala para descargar?	Si No Detallar:
3 ¿Su actividad requiere que este muy cerca del camión / pala?	Si No
4 ¿Ha identificado si el área donde va a ingresar es la suficiente?	Si No
5 ¿Ha parado su equipo varias veces por mantenimiento correctivos?	Si No
6 ¿Ha sufrido daños el equipo por golpes de la pala minera durante el carguío?	Si No
7 ¿Ha sufrido daños el equipo por golpes del camión durante su retroceso o avance?	Si No
8 ¿Usted cree si tuviera un sistema que le facilite la aproximación hacia la pala en retroceso podría mejorar la operación del equipo y reducir daños?	Si No
9 ¿Conoce el impacto económico que representa si un camión o pala minera sufre un daño y cuanto impacta a la productividad?	Si No
10 ¿Qué alternativas de solución propone para evitar una colisión entre camiones y palas mineras?	

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 5

Tabla 23.

Formato de Lista de Verificación (Cotejo)

Lista de verificación (cotejo)		
Nombre del Evaluador:		
1	Mencione el tipo de equipo móvil que está evaluando:	
2	Cuantos puntos ciegos y donde los presenta:	
3	Los equipos de acarreo ingresan con dificultad a la zona de carguío.	Si No
4	Las palas realizan maniobras temerarias con riesgo de colisión.	Si No
5	Se ha identificado daños estructurales por colisión entre camión y pala (sin discriminar los más insignificantes).	Si No
6	El terreno es reducido y es accidentado.	Si No
7	No existe un criterio, procedimiento, método entre camión y pala para posicionarse en la etapa de carguío.	Si No

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 6

Tabla 24.

Cuadro de Calificación Lista de Verificación (Cotejo)

Nivel de necesidad de mejora		
1	Necesidad muy alta	5 Si
2	Necesidad alta	4 Si
3	Necesidad moderada	3 Si
4	Necesidad baja	2 Si
5	No hay necesidad de mejora	1 Si

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 7



Figura 25. Imágenes de evidencia del trabajo de recolección de data en campo. Elaboración propia

ANEXO 8

Videos de recolección en campo.

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1gN-sZI2t-kxRFmeGaR2QcYDvTTEuy0fO>