Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización de la confiabilidad en el planeamiento de minado a mediano plazo mediante modelado estocástico del ciclo de carguío y acarreo integrando el software MinePlan y Rockwell Arena en una mina del sur del Perú

Tesis presentada por:

Cruz Choque, Ivan Jesus

ORCID: 0009-0001-4243-382X

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Ticona Corrales, Sergio

ORCID: 0000-0002-7221-6172

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 12 de Octubre del 2026

Dictamen: 019358-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 019358, presentado por:

2016100581 - CRUZ CHOQUE IVAN JESUS

Titulado:

OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN EL PLANEAMIENTO DE MINADO A MEDIANO PLAZO MEDIANTE MODELADO ESTOCÁSTICO DEL CICLO DE CARGUÍO Y ACARREO INTEGRANDO EL SOFTWARE MINEPLAN Y ROCKWELL ARENA EN UNA MINA DEL SUR DEL PERÚ

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR

40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR

70360439 - PAZ ZEVALLOS CRISTIAN ZENON
DICTAMINADOR

OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN EL PLANEAMIENTO DE MINADO A MEDIANO PLAZO MEDIANTE MODELADO ESTOCÁSTICO DEL CICLO DE CARGUÍO Y ACARREO INTEGRANDO EL SOFTWARE MINEPLAN Y ROCKWELL ARENA EN UNA MINA

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	14%	4%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	1%
9	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
10	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1%
12	cris.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1%
14	1library.co Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Dedico mi tesis de titulación a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría necesaria para lograr esta meta. A mi familia y a mi pareja, Flordelina, quienes me acompañaron en el día a día, por su aliento constante y por compartir conmigo el esfuerzo detrás de este logro. A mi universidad, por haberme permitido dar los primeros pasos en este gran sueño llamado Ingeniería de Minas.

Esta tesis es el fruto de un arduo trabajo y de un esfuerzo constante, impulsados por el anhelo de crecer y ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por guiar mi camino, brindarme salud y ser mi sostén en cada momento de este proceso. A mi familia y a mi pareja, Flordelina, por su comprensión, apoyo incondicional y por estar siempre presentes, convirtiéndose en mi mayor impulso para no rendirme jamás. A mi universidad y a cada uno de mis profesores, por la formación brindada, por compartir sus conocimientos y por haberme guiado en mis primeros pasos dentro de la Ingeniería de Minas.

Asimismo, expreso mi sincera gratitud a todas las personas y organizaciones que colaboraron en el transcurso de esta investigación, facilitando la información y herramientas necesarias para hacer realidad esta tesis.

A todos los que de una u otra manera formaron parte de esta etapa, mi más profundo reconocimiento por motivarme a ser mejor profesional y persona cada día.

RESUMEN

La presente investigación desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos en Rockwell Arena para el proceso de carguío y acarreo en una unidad minera a tajo abierto del sur del Perú, con el objetivo de sincerar la productividad real de la flota y mejorar la precisión del planeamiento a mediano plazo. La unidad minera empleaba tradicionalmente enfoques determinísticos basados en promedios fijos, ignorando la variabilidad en los tiempos de ciclo y las interrupciones operativas.

La metodología integró datos de Dispatch (primer semestre 2026), ajustando distribuciones de probabilidad en Input Analyzer para tiempos fijos y estimando distancias equivalentes en MinePlan Haulage. El modelo simuló 6 equipos de carguío y una flota de 33 camiones de 235 t (30 a 31 operativos en vías y 2 a 3 en mantenimiento), incorporando restricciones de aculatamiento, paradas breves y cambios de guardia. Presentando una correspondencia satisfactoria con los cuatro días independientes evaluados, dentro del margen de error relativo establecido (errores ±5%), se evaluó el escenario 2027, identificando una capacidad potencial simulada de 92.8 Mt frente a las 87.5 Mt del plan base (+5.3 Mt) bajo los mismos niveles de disponibilidad y utilización. Se concluye que el modelo estocástico aproxima el rendimiento operativo mitigando los sesgos determinísticos, ofrece un marco estadístico al 95% de confianza y contribuye a respaldar la toma de decisiones en el planeamiento de minado.

Palabras clave: Simulación de eventos discretos, carguío y acarreo, planeamiento de mediano plazo.

ABSTRACT

This research developed a discrete event simulation model in Rockwell Arena for the loading and hauling process in an open-pit mine in southern Peru, aiming to reconcile realistic fleet productivity and improve medium-term mine planning accuracy. The mining operation traditionally relied on deterministic approaches based on fixed averages, ignoring cycle time variability and operational interruptions.

The methodology integrated Dispatch data from the first half of 2026, fitting probability distributions in Input Analyzer for fixed times and estimating equivalent distances in MinePlan Haulage. The model simulated 6 loading units and a fleet of 33 trucks (235-ton payload), with 30 to 31 active on haul roads and 2 to 3 undergoing scheduled maintenance, incorporating constraints such as queuing, short delays, and shift changes. Presenting a satisfactory correspondence with the four evaluated independent days, remaining within the established relative error margin (errors within ±5%), the 2027 scenarios were evaluated, identifying a simulated potential capacity of 92.8 Mt compared to the 87.5 Mt of the base plan (+5.3 Mt) under the same availability and utilization levels. It is concluded that the stochastic model approximates operational performance while mitigating deterministic biases, provides a statistical framework at a 95% confidence level, and contributes to supporting decision-making in mine planning.

Keywords: Discrete event simulation, loading and hauling, medium-term planning.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION 1

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION 2

1.1 Planteamiento del Problema 2

1.2 Objetivos de la investigación 3

1.2.1 Objetivo General 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 Preguntas de Investigación 4

1.4 Línea de Investigación 4

1.5 Palabras Clave 5

1.6 Solución Propuesta 5

1.6.1 Justificación e Importancia 5

1.6.2 Descripción de la Solución 6

CAPITULO II: FUNDAMENTOS TEORICOS 8

2.1 Estado del arte 8

2.1.1 Antecedentes Nacionales 8

2.1.2 Antecedentes Internacionales 17

2.2 Generalidades de la Mina 19
2.2.1 Ubicación de la Mina 19
2.2.2 Accesibilidad 19
2.2.3 Geología 20
2.2.3.1 Geología estructural 21
2.2.3.2 Mineralogía 22
2.2.3.3 Estratigrafía 23
2.2.4 Método de explotación 24
2.2.4.1 Características principales 24
2.2.4.2 Equipos de minado 25
2.2.4.3 Ventajas de minado a cielo abierto 25
2.2.5 Bases Teóricas 26
2.2.5.1 ¿Qué es la simulación de sistemas? 26
2.2.5.1.1 Ventajas 26
2.2.5.1.2 Campos y ejemplos de sistemas a simular 26
2.2.5.2 Fases de un proyecto de simulación 27
2.2.5.3 Tipos de simulación 28
2.2.5.3.1 Simulación Discreta 28
2.2.5.3.2 Simulación Continua 28
2.2.5.4 Elementos de un sistema a simular 28
2.2.5.4.1 Entidades 28
2.2.5.4.2 Actividades 29

2.2.5.4.3 Recursos 29
2.2.5.4.4 Atributos 29
2.2.5.4.5 Variables globales 30
2.2.5.4.6 Variables aleatorias 30
2.2.5.4.7 Indicadores del sistema 30
2.2.5.5 Representación esquemática de simulaciones de sistema 31
2.2.5.6 Software arena 33
2.2.5.7 Módulos básicos en arena 33
2.2.5.7.1 Módulo Create 33
2.2.5.7.2 Módulo Process 34
2.2.5.7.3 Módulo Dispose 34
2.2.5.7.4 Módulo Assign 35
2.2.5.7.5 Módulo Decide 36
2.2.5.7.6 Módulo Record 36
2.2.6 Definiciones 37
2.2.6.1 Modelo Determinístico 37
2.2.6.2 Modelo Estocástico 37
2.2.6.3 Simulación de Eventos Discretos (SED) 37
2.2.6.4 Ciclo de Carguío y Acarreo 38
2.2.6.5 Modelo de Simulación Estocástica del Sistema 38
2.2.6.6 Stripping Ratio (Relación Estéril/Mineral) 38
2.2.6.7 Cuello de Botella 38

2.2.6.8 Pushback (Fase de Minado) 38
2.2.6.9 KPI 39
2.2.6.10 Productividad de Carguío 39
2.2.6.11 Sinceramiento de la Productividad 39
2.2.6.12 Precisión del Planeamiento 39
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO 40
3.1 Alcances y Limitaciones 40
3.1.1 Alcances 40
3.1.2 Limitaciones 40
3.2 Tipo y Nivel de Investigación 40
3.3 Hipótesis de Investigación 41
3.3.1 Hipótesis General 41
3.4 Variables 41
3.4.1 Variables Independientes 41
3.4.2 Variables Dependientes 41
3.5 Población y Muestra o Universo 42
3.5.1 Población 42
3.5.2 Muestra 42
3.6 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 43
3.6.1 Método de Investigación 43
3.6.2 Técnicas de Recolección de Datos 43
3.6.3 Instrumentos de Recolección de Datos 43

3.7 Plan de Análisis de los Datos 44

3.7.1 Técnicas de Análisis de Datos 44

3.7.2 Sustento Estadístico y Justificación Metodológica del Ajuste de Distribuciones 46

3.8 Configuración de Parámetros de Simulación y Réplicas en Arena 46

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES 48

4.1 Descripción del sistema a modelar 48

4.1.1 Estacionalidad y Movimiento de Materiales 48

4.1.2 Estructura de los Ciclos Operativos (Carguío y Acarreo) 49

4.2 Recolección y análisis de datos 50

4.2.1 Determinación de Distribuciones de Probabilidad para Tiempos Fijos 50

4.2.2 Estimación de Tiempos Variables mediante MinePlan 51

4.2.3 Análisis de datos 54

4.3 Construcción del modelo a ser simulado en Arena 58

4.3.1 Identificación de componentes del modelo 58

4.3.2 Consideraciones para la construcción del modelo 59

4.3.3 Diseño y construcción del modelo 61

4.4 Verificación y validación 85

4.4.1 Verificación 85

4.4.2 Validación Independiente del Modelo 86

4.5 Simulación de escenarios futuros 90

4.5.1 Productividades Simuladas vs. Productividades de Planificación 92

4.6 Análisis de resultados 93

4.7 Valor Estratégico y alcance del Plan Sincerado 97

CONCLUSIONES 98

RECOMENDACIONES 99

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Ajuste de distribuciones de probabilidad para los tiempos de ciclo en época húmeda* 56

Tabla 2 *Ajuste de distribuciones de probabilidad para los tiempos de ciclo en época seca* . 57

Tabla 3 *Validación para época húmeda* 88

Tabla 4 *Validación para época Seca* 89

Tabla 5 *Resultados simulados y datos para análisis vs plan– Época húmeda* 92

Tabla 6 *Resultados simulados y datos para análisis vs plan– Época seca* 93

Tabla 7 *Plan actual 2027 de tonelajes movidos por equipo y quarters* 94

Tabla 8 Plan actual 2027 de tonelajes movidos simulados por equipo y quarters 95

Tabla 9 *Comparativa entre plan y simulación* 96

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Esquematización de un sistema de producción en serie* 31

Figura 2 *Esquematización de varias colas y servidores* 32

Figura 3 *Esquematización de cola máxima-serie-abandonos* 32

Figura 4 *Módulo Create* 33

Figura 5 *Módulo Process* 34

Figura 6 *Módulo Dispose* 35

Figura 7 Módulo Assign 35

Figura 8 *Módulo Decide* 36

Figura 9 *Módulo Record* 37

Figura 10 *Rutas en Haulage correspondientes al tajo y chancadora* 51

Figura 11 *Rutas en Haulage correspondientes al WRF* 52

Figura 12 *Rutas en Haulage correspondientes al TMF* 52

Figura 13 *Curvas de velocidad para calculo de EFH en época húmeda y seca* 53

Figura 14 *Ejemplificación de distribución en imput analizar y su Sq error* 55

Figura 15 *Diagrama de flujo de la lógica operativa del modelo de simulación en Arena* 61

Figura 16 *Diagrama de flujo de incorporación de camiones y definición de atributos de simulación en Arena* 62

Figura 17 *Parámetros del Módulo Create usados en el simulador* 62

Figura 18 *Parámetros del Módulo Assign usados en el simulador* 63

Figura 19 *Diagrama de flujo de asignación de frentes y atributos de simulación en Arena* . 64

Figura 20 *Parámetros del Módulo Decide usados en el simulador* 64

Figura 21 *Parámetros en frentes usados en el simulador* 65

Figura 22 *Diagrama de flujo de asignación de cambio de frentes de simulación en Arena* . 66

Figura 23 *Diagrama de flujo de carguío en frentes de simulación en Arena* 67

Figura 24 Parámetros del Módulo Process en cuadrado y acomodo en frentes usados en el simulador 68

Figura 25 *Parámetros del Módulo Process en carguio en frentes usados en el simulador*... 68

Figura 26 *Parámetros del Módulo Release en carguio en frentes usados en el simulador*... 69

Figura 27 *Diagrama de flujo distribución de rutas en frentes de simulación en Arena* 70

Figura 28 *Parámetros del Módulo Decide para distribución de rutas usadas en el simulador* 71

Figura 29 *Parámetros del Módulo Assign para atributos de rutas usadas en el simulador*.. 71

Figura 30 *Diagrama de flujo de destinos de simulación en Arena* 72

Figura 31 *Parámetros del Módulo Process para descargas usadas en el simulador*..... 73

Figura 32 Parámetros del Módulo Process para tiempo viajando cargado usado en el simulador 74

Figura 33 *Parámetros del Módulo Process para cuadrado en crusher usado en el simulador* 74

Figura 34 *Parámetros del Módulo Process para descarga en crusher usado en el simulador* 75

Figura 35 *Parámetros del Módulo Release usado en el simulador* 76

Figura 36 *Parámetros del Módulo Process de procesamiento del material usado en el simulador*..... 76

Figura 37 *Parámetros del Módulo Assign de atributos en descarga usado en el simulador* 77

Figura 38 *Diagrama de flujo de cambio de guardia y mantenimiento usados en la simulación en Arena* 77

Figura 39 *Parámetros del Módulo Decide para cambio de guardia usado en el simulador*. 78

Figura 40 *Parámetros del Módulo Process para cambio de guardia usado en el simulador* 78

Figura 41 *Parámetros del Módulo Process para cambio en caliente usado en el simulador* 79

Figura 42 *Parámetros del Módulo Process para retorno al frente usado en el simulador* ... 79

Figura 43 *Parámetros del Módulo Process para retorno al frente por destino usado en el simulador* 80

Figura 44 *Parámetros del Módulo Decide para mantenimiento usado en el simulador* 81

Figura 45 *Parámetros del Módulo Process para mantenimiento usado en el simulador* 81

Figura 46 *Parámetros del Módulo Record usado en el simulador* 82

Figura 47 *Parámetros del Módulo decide para distribución de camiones usado en el simulador* 82

Figura 48 *Medidores de tonelaje por destino y por equipo usado en el simulador* 83

Figura 49 *Graficas de seguimiento usado en el simulador* 84

Figura 50 *Arquitectura general del simulador* 85

Figura 51 *Quarters de minado para el 2027 en tajo* 91

Figura 52 *Quarters de descarga WRF para el 2027* 91

Figura 53 *Quarters de descarga TMF para el 2027* 92

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 *Vista del tajo de la unidad minera en estudio* 103

Anexo 2 *Vista del WRF y stock de la unidad minera en estudio* 103

Anexo 3 *Vista del TMF de la unidad minera en estudio* 104

INTRODUCCION

En la minería a tajo abierto, el carguío y acarreo es el proceso más costoso e influyente en la rentabilidad del negocio. Por ello, contar con un plan de minado a mediano plazo preciso resulta indispensable. Sin embargo, en la unidad minera en estudio, la estimación del rendimiento de la flota se basaba tradicionalmente en promedios fijos. Este enfoque determinístico ignora la variabilidad real de la operación como esperas en chancadora, aculatamientos y cambios de guardia, generando brechas constantes entre el tonelaje planificado y el realmente extraído.

Para superar esta limitación, esta investigación propone utilizar la simulación de eventos discretos en Rockwell Arena, integrando datos del sistema Dispatch (primer semestre de 2026), Input Analyzer y rutas de MinePlan Haulage. El modelo abarca 6 equipos de carguío y una flota de 33 camiones de 235 t (con 30 a 31 activos en vías y 2 a 3 en mantenimiento), recreando la dinámica real del tajo.

Bajo este escenario, el objetivo general de la tesis es crear un modelo de simulación de eventos discretos para el proceso de carguío y acarreo que permita sincerar la productividad real de la flota y mejorar la precisión del planeamiento de minado a mediano plazo.

CAPITULO I:

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del Problema

El proceso de carguío y acarreo constituye parte de la operación más crítica y costosa en la minería de cielo abierto en el sur del Perú, representando el componente principal de los costos operativos. Actualmente, el planeamiento de mediano plazo en la unidad de estudio se fundamenta en modelos determinísticos que emplean valores promedio estáticos para proyectar la productividad de la flota. Este enfoque lineal resulta insuficiente para capturar la naturaleza dinámica de los procesos, donde la aleatoriedad en los tiempos de ciclo y la interdependencia entre los recursos de la cadena generan una variabilidad que no logra ser integrada con precisión en los horizontes de planificación trimestrales o anuales.

Como consecuencia de este desfase, existe una discrepancia recurrente entre el tonelaje programado y la capacidad real de respuesta del sistema, impactando gravemente la confiabilidad de los planes de mediano plazo. Cuando la productividad estimada es mayor a la real, se incumplen las metas de tonelaje de mineral y los compromisos de movimiento de material (TMF), obligando a rediseños apresurados de subfases que, en ocasiones, fuerzan la extracción prematura de mineral o afectan el acceso a zonas críticas. Por el contrario, si la productividad real supera la estimada, se genera un avance excesivo del minado en zonas de mineral expuesto, lo que deriva en un envío prematuro a los stocks incrementando innecesariamente los costos financieros y alterando la secuencia de minado, la cual debe ser corregida reactivamente en el corto plazo.

Ante este desafío, surge la necesidad de crear un simulador operativo en Arena que permita integrar distribuciones de probabilidad específicas para los tiempos de carguio, ciclos de viaje y descarga, bajo una perspectiva de mediano plazo. El uso de esta herramienta permitirá reducir la incertidumbre en los parámetros de entrada (inputs) de productividad, logrando un

sinceramiento de la productividad del sistema. De esta manera, se busca transformar el planeamiento actual hacia un modelo predictivo, capaz de anticipar escenarios operativos e incrementar la precisión en la planificación de recursos respecto a la capacidad de ejecución de la unidad minera.

Al implementar esta metodología de simulación, la operación reduce su dependencia de proyecciones determinísticas vulnerables a la variabilidad aleatoria, adoptando un enfoque fundamentado en la confiabilidad estadística. Esto contribuye a mitigar el riesgo de desviaciones productivas y proporciona a la gestión operativa planes de mediano plazo más robustos y fundamentados en una capacidad instalada validada y realista. En última instancia, la transición hacia este modelo de gestión aporta a la sostenibilidad técnica del proceso, elevando la confiabilidad de las metas de tonelaje reportadas bajo condiciones reales de operación.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos del proceso de carguío y acarreo que permita determinar los niveles reales de productividad, reduciendo la incertidumbre en los parámetros de entrada y mejorando la precisión del planeamiento de mediano plazo en una mina de tajo abierto.

1.2.2 Objetivos Específicos

• Evaluar la desviación existente entre la productividad proyectada en el planeamiento de mediano plazo y la productividad real alcanzada en las operaciones de carguío y acarreo, mediante el análisis de datos históricos de la unidad minera.

• Identificar y ajustar las distribuciones de probabilidad de las variables operativas críticas (tiempos de carga, tiempos de viaje en vacío/cargado, y tiempos de descarga) para la construcción de una base de datos estocástica que alimente el software Arena.

• Desarrollar el simulador en Arena mediante la lógica de eventos discretos y validar el modelo comparando los resultados simulados con el desempeño histórico real, obteniendo una correspondencia satisfactoria con la capacidad del sistema minero dentro del margen de error establecido.

• Determinar la viabilidad operativa de los planes de minado de mediano plazo mediante el contraste con los resultados del simulador, permitiendo la identificación oportuna de ajustes en las metas de producción y en la estrategia de movimiento de material.

1.3 Preguntas de Investigación

¿Cómo influye el desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos en el ajuste real de los parámetros de productividad del ciclo de carguío y acarreo, para mejorar la precisión del planeamiento minero a mediano plazo en una unidad de tajo abierto al sur del Perú?

1.4 Línea de Investigación

Esta investigación se enmarca en la línea de Optimización de Procesos Mineros, abordando el ciclo de carguío y acarreo mediante simulación estocástica. El estudio busca superar las limitaciones de los modelos tradicionales, orientándose hacia la digitalización y el sinceramiento de parámetros para optimizar la eficiencia del planeamiento minero a mediano plazo

1.5 Palabras Clave

Simulación de eventos discretos, carguío y acarreo, planeamiento de mediano plazo, productividad, tajo abierto, Variabilidad estocástica.

1.6 Solución Propuesta

1.6.1 Justificación e Importancia

El planeamiento de minado de mediano plazo en operaciones a tajo abierto ha dependido tradicionalmente de modelos determinísticos y promedios estáticos para estimar el rendimiento de la flota de carguío y acarreo. Este enfoque asume la capacidad del sistema bajo condiciones ideales o teóricas de operación, ignorando la variabilidad estocástica inherente a los tiempos de posicionamiento, acoplamiento, carga, transporte y descarga. Como consecuencia, se generan discrepancias sistemáticas con respecto a la productividad real obtenida en campo.

La presente investigación se justifica técnicamente al desarrollar e implementar un modelo de simulación de eventos discretos en el software Arena, constituido como una representación estocástica de la operación. Esta herramienta permite realizar el sinceramiento de la productividad mediante la integración de distribuciones de probabilidad reales en lugar de medias aritméticas, reduciendo el margen de incertidumbre operativa e incrementando de forma cuantificable la precisión del planeamiento de mediano plazo.

La importancia de este estudio radica en tres pilares fundamentales para el éxito operacional de una mina de tajo abierto:

• Reducción de Incertidumbre: Al cuantificar la variabilidad operativa mediante la simulación, la mina podrá anticipar desviaciones en el plan de producción, mitigando los riesgos financieros derivados de incumplimientos en los compromisos de movimiento de material.

• Optimización Económica: Al proporcionar estimaciones de producción con un sustento estadístico, la simulación permite optimizar la asignación de recursos y anticipar restricciones operativas. Esto contribuye a estabilizar los ritmos de minado, optimizar el uso de los activos mineros y mitigar los sobrecostos asociados a la variabilidad de la producción diaria.

• Valor Estratégico en el Planeamiento: Esta herramienta permite analizar la variabilidad del sistema mediante distribuciones de probabilidad en lugar de medias aritméticas, contribuyendo a atenuar la incertidumbre en las estimaciones del planeamiento de mediano plazo. Asimismo, el enfoque probabilístico proporciona información cuantitativa para evaluar la asignación de recursos e identificar potenciales restricciones operativas bajo los supuestos del modelo.

1.6.2 Descripción de la Solución

La solución propuesta plantea el desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos para el sistema de carguío y acarreo mediante el software Arena. Este modelo reemplaza los cálculos determinísticos tradicionales por un enfoque estocástico y dinámico, lo que permite integrar la variabilidad inherente a las operaciones mineras a cielo abierto.

El desarrollo y validación del simulador se fundamenta en tres etapas metodológicas interrelacionadas:

- **Modelado estocástico y ajuste de datos de entrada (Input Analyzer):** A partir del procesamiento de bases de datos históricas operativas, se realiza el ajuste de distribuciones de probabilidad para las variables críticas del ciclo (tiempos de carga, viaje y descarga).
- **Construcción y validación del simulador en Aren**a: Se replica la lógica operativa mediante la interacción entre las entidades (camiones) y los recursos (palas y cargadores). El modelo global se valida comparando los indicadores de producción

simulados frente a los registros históricos reales mediante una prueba de t-Student para muestras emparejadas, garantizando un error relativo porcentual inferior al 5%.

- **Análisis de escenarios y toma de decisiones:** Una vez validado, el modelo funciona como un entorno de experimentación controlado para evaluar el impacto de modificaciones en la asignación de la flota, variaciones en las rutas de acarreo, configuración de frentes de minado o cuellos de botella. A través de este análisis, se generan intervalos de confianza cuantitativos que permiten a la gerencia de planeamiento de mediano plazo fundamentar sus decisiones en estimaciones probadas estadísticamente en lugar de supuestos determinísticos e ideales.

En conjunto, esta herramienta transforma el planeamiento minero tradicional en un proceso de análisis predictivo, permitiendo establecer metas de producción técnicamente factibles y sostenibles ante la variabilidad e incertidumbre de la operación diaria.

CAPITULO II:

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Estado del arte

La simulación de eventos discretos mediante el software Arena se ha consolidado como la herramienta estándar en la ingeniería minera moderna para la toma de decisiones bajo incertidumbre. A diferencia de los modelos determinísticos, esta permite modelar la variabilidad inherente a las operaciones mineras, como fallas aleatorias, tiempos de ciclo variables y condiciones logísticas cambiantes, proporcionando una visión holística del sistema. A continuación, se detallan las investigaciones más relevantes que han aplicado esta metodología para optimizar la productividad y eficiencia operativa.

2.1.1 Antecedentes Nacionales

a) Coral, J. (2020). En su tesis "Simulación del Proceso de Mantenimiento de Camiones 797F en Simulador ARENA para mejora de la Disponibilidad" por la Universidad Tecnológica del Perú realizo una investigación en la empresa MMG Las Bambas en la región de Apurímac, ésta revela una dificultad en la unidad minera, ya que el área de mantenimiento necesita una mayor disponibilidad de camiones 797F.

La investigación está dividida en dos secciones:

La primera parte se centra en realizar una simulación para encontrar errores en el cuello de botella que puedan afectar los tiempos de mantenimiento y, por lo tanto, la disponibilidad de la flota de camiones 797F. El objetivo es mejorar la disponibilidad al optimizar los procesos de mantenimiento.

El segundo se enfoca en el modelamiento con arena y en los errores por cuello de botella priorizando la necesidad de contratar un técnico adicional por guardia, lo que equivale a cuatro

técnicos en total, para permitir trabajos en paralelo y disminuir los tiempos de mantenimiento. La disponibilidad aumentó del 90.5% al 92.28% como resultado de esta medida. Como se ha podido ver, mediante la investigación y los resultados obtenidos utilizando el software arena, se logró optimizar un KPI como la disponibilidad, lo que demuestra su amplia utilización y flexibilidad.

b) Rondón, C. (2020). En su tesis "Propuesta de optimización en el proceso de abastecimiento de combustible líquido a la empresa minera cerro verde en una empresa de transportes en la zona sur del Perú" por la Universidad Católica de Santa María realizo una investigación en la unidad minera Cerro verde en la región de Arequipa, ésta investigación aborda la problemática de la eficiencia en el transporte de combustible líquido destinado al abastecimiento de la empresa minera Cerro Verde, ubicada en las principales unidades mineras del sur del país. La empresa se enfrenta a problemas de gestión de recursos como camiones y conductores, lo que resulta en ineficiencias y costos adicionales durante el proceso de suministro de combustible.

El software Arena se utilizó para crear un modelo que representa cómo se transporta el combustible a Cerro Verde. Se han realizado pruebas y análisis para determinar que este modelo de Arena representa con precisión cómo funciona el proceso de transporte en la vida real.

Se han propuesto mejoras basadas en este modelo inicial para aumentar la eficiencia y reducir los costos. Estas mejoras han permitido aumentar la cantidad promedio de viajes mensuales de 235 a 249, lo que equivale a un aumento del 5,9% en la cantidad de galones entregados.

Además, se realizó un análisis económico detallado que comparó el modelo de transporte actual con el propuesto. El análisis ha demostrado que el modelo propuesto es más rentable y viable que el método de transporte actual. Por lo mismo, se llega a la conclusión de

que el modelo de transporte sugerido es factible de llevar a cabo en la práctica, lo que permitirá a Cerro Verde desminuir los costos operativos y mejorar la eficiencia de su sistema de suministro de combustible.

c) Bazalar, J. (2023). En su tesis "Propuesta de un modelo de simulación de líneas de espera para optimizar el tiempo y el número de camiones de transporte de material y palas de la mina de Fosfato Bayovar a la planta concentradora" por la Universidad Privada Antenor Orrego realizo una investigación en la unidad minera Sechura de la empresa Miski Mayo donde se buscó determinar el número ideal de camiones mineros y palas necesarios para garantizar un transporte eficiente de minerales a la zona de acopio y evitar el desabastecimiento en la planta concentradora. Para lograrlo, se utilizó la herramienta de simulación Arena Versión 12 en su versión estudiantil.

Después de analizar varios escenarios basados en los datos de producción reales de MiskiMayo, se descubrió que la empresa actualmente opera con 7 palas y 20 camiones mineros, transportando alrededor de 10'099,249.78 toneladas al año. Esta cifra representa un 3,9 % aproximado en comparación con la producción declarada por la empresa en 2016, así como 916,000 toneladas en mayo de 2021. Sin embargo, el modelo de simulación arrojó un resultado mensual de 918,000 toneladas, con una diferencia cercana al 0,02 %. Estos hallazgos confirman la precisión de la simulación.

Además, se descubrió que la configuración ideal es de 22 camiones y 8 palas después de realizar escenarios con parámetros que incluían 18 y 22 camiones y 6 u 8 palas. El transporte de mineral aumentaría en aproximadamente un 5% como resultado de esta optimización. En resumen, la investigación ofrece una estrategia basada en simulación para mejorar la eficiencia del transporte de mineral en la mina de MiskiMayo, lo que podría tener un impacto significativo en su producción y rentabilidad.

d)Morales, M. (2019). En su tesis "Modelamiento y simulación del minado y re manipulación de mineral en una mina a tajo abierto: En una unidad minera ubicada al norte del Perú", por la Universidad Católica de Santa María, realizo una investigación centrada en la representación de los procesos tales como, la utilización de equipos y asignación de camiones a palas o cargadores, tomando en cuenta los costos de carguío y acarreo mediante la simulación con el software Arena para un escenario de remanejo.

La simulación virtual permitió evaluar las condiciones técnicas y económicas ideales, incluidas las rutas y prácticas de minado de mineral, y también tomar en cuenta los costos adicionales relacionados con el almacenamiento temporal de minerales. El objetivo es demostrar la eficiencia de los camiones en la extracción de mineral mediante indicadores de rendimiento. Para lograr esto, fue necesario experimentar con una variedad de escenarios y determinar la asignación de camiones más eficiente representando mediante el estudio, un ahorro sustancial al no realizar un remanejo en el proceso, representando un costo adicional del 24.08%. Así mismo al ajustar las variables específicas de cada mina, el modelo de simulación puede ser adaptado para su uso en otras operaciones mineras.

e) Bujaico, G., & Huayanca, D. (2022). En su tesis "Aplicación de simulación discreta en la estimación del número de camiones en una mina de cobre a tajo abierto" por la Pontificia Universidad Católica del Perú realizo una investigación en una unidad minera que produce concentrados de cobre donde propone una técnica de simulación de eventos discretos para calcular la flota de camiones requerida en una operación minera de extracción de cobre a tajo abierto. El método utiliza variables aleatorias para representar las condiciones operativas reales. El caso de estudio plantea la posibilidad de aumentar la producción de 100,000 a 140,000 toneladas diarias, lo que requeriría la incorporación de más camiones a la flota actual de 29. Aunque se estima la flota utilizando una metodología determinística, se reconoce la necesidad de evaluar criterios y ajustar variables.

Asimismo, se compara la aplicación de modelos estocásticos y determinísticos para representar el proceso de carguío y acarreo mediante el software Arena. Los datos recopilados permiten calibrar el modelo estocástico, el cual se valida replicando los doce meses del plan anual de producción. Los tiempos de viaje se estiman utilizando el algoritmo de Dijkstra, mientras que el procesamiento de los resultados se realiza con Python en Jupyter Notebook. Finalmente, el cálculo de las horas trabajadas, la productividad, el tiempo promedio del ciclo de acarreo y la distancia media recorrida permite justificar la flota de camiones requerida mes a mes.

Los resultados de las simulaciones muestran que el uso de modelos estocásticos modifica la estimación de la flota necesaria, haciendo indispensable incorporar 13 camiones desde diciembre de 2022 hasta fines de 2023 para alcanzar la producción programada. Si bien este aumento en el número de volquetes genera mayores tiempos de espera en las zonas de carguío, también pone en evidencia una oportunidad de optimización operativa para mitigar el impacto de estas colas.

f) Padrón, J., & Mayhua, Y. (2022). En su tesis "Propuesta de mejora del sistema de gestión en el área de mantenimiento de palas de una empresa minera para mejorar la disponibilidad y productividad de los equipos, aplicando Mantenimiento Productivo Total (TPM)" por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas , realizaron una investigación en una unidad minera al sur del Perú con el objetivo de analizar los datos recopilados en el área de mantenimiento en 2020 para comprender por qué las palas no estaban disponibles durante el proceso de carguío. La investigación reveló que la causa principal de esta problemática son las deficiencias en la gestión del mantenimiento.

En respuesta, se propuso el Mantenimiento Productivo Total (TPM), que incluye la implementación de las 5S, el mantenimiento planificado, la seguridad, el medio ambiente y el entrenamiento para operadores. Se realizó una simulación en el software Arena para comparar

los resultados antes y después de la implementación del TPM para evaluar el impacto de estas mejoras. Los datos mostraron un aumento del 4.2% en la disponibilidad de palas, lo que demuestra el éxito de las mejoras en la gestión del mantenimiento sugeridas.

g) Gutiérrez, F. (2014). En su tesis "Propuesta de optimización de la producción en la planta de agregados core material de la empresa concretos Supermix S.A. - proyecto CVPUE mediante la técnica de simulación" por la Universidad Católica de Santa María el autor investiga la planta de agregados Core Material de Concretos Supermix S.A., vinculada al proyecto de expansión de la unidad de producción Cerro Verde. Con el propósito de cumplir el contrato acordado entre Concretos Supermix S.A. y Sociedad Minera Cerro Verde, el estudio plantea como objetivo central la optimización del proceso productivo.

El estudio comienza identificando oportunidades de mejora al analizar la situación actual. El sistema se representa con precisión mediante el uso de un modelo de simulación. Se pueden aumentar los ratios de producción hasta en un 27%, asegurando niveles requeridos, experimentando con la cantidad y tipo de recursos utilizados.

Además, se realiza una evaluación económica de las propuestas, que concluye que la empresa debe implementarlas para cumplir con el contrato y obtener beneficios económicos y de prestigio significativos. En resumen, el documento propone mejoras significativas en el proceso de producción con el fin de garantizar el cumplimiento del contrato y el éxito económico de Concretos Supermix S.A. en el proyecto de expansión de la unidad de producción Cerro Verde.

h) Pérez, C. (2015). En su tesis "Propuesta de optimización productiva para el mantenimiento y reparación de cilindros hidráulicos en una empresa metalmecánica aplicando técnica de simulación" por la universidad Católica de Santa María realizo una investigación en la empresa Hydraulic Systems SAC ubicada en Arequipa que brinda servicios de

mantenimiento y reparación de cilindros hidráulicos, principalmente a clientes que trabajan en la industria minera, con el objetivo de analizar el área de producción y mejorar los índices de productividad del área.

El proceso comienza con un diagnóstico situacional de la empresa para ver cómo se comportan los recursos del sistema e identificar posibles problemas. Para cumplir con los objetivos establecidos y satisfacer la demanda prevista, se propone un escenario que aumenta los índices de producción. El programa Arena 14.0 se utiliza para validar estos resultados.

Finalmente, se realiza una evaluación económica de los resultados, que llega a la conclusión de que la empresa debería implementar el escenario sugerido para satisfacer todas las reparaciones solicitadas por los clientes del mercado. Se espera que esto aumente los ingresos y mejore la reputación de la empresa. En conclusión, el documento propone medidas específicas para mejorar la productividad, satisfacer la demanda del mercado y obtener beneficios financieros y de reputación para Hydraulic Systems SAC.

i) **Hernández, C. (2026).** En su tesis "Desarrollo de un simulador de eventos discretos para el análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto" por la Universidad de Concepción realizó una investigación centrada en la modelación y optimización del sistema de carguío y transporte en operaciones mineras a cielo abierto, con el objetivo de desarrollar una herramienta de software personalizada que permita evaluar escenarios operativos, identificar cuellos de botella y mejorar los indicadores clave de producción. El proceso comienza con el diseño de una arquitectura desacoplada, utilizando Python con la librería SimPy para el motor de simulación de eventos discretos y FastAPI para la comunicación, integrada a un frontend interactivo en 3D para la visualización en tiempo real y el seguimiento de KPIs mediante un módulo especializado (ProductionBadge). Para cumplir con los objetivos establecidos, el simulador incorpora distribuciones probabilísticas y réplicas independientes mediante simulación Monte Carlo. Los programas de referencia utilizados para la validación de

los resultados fueron un modelo determinista en Excel y el software ProModel. Finalmente, se concluye que el simulador es una alternativa robusta e independiente frente a los softwares comerciales tradicionales, logrando representar de manera precisa la dinámica del sistema operativo de carguío y transporte. En conclusión, el trabajo aporta una herramienta funcional y escalable que permite analizar tiempos de espera, factores de utilización y tasas de producción para optimizar la toma de decisiones en la planificación minera.

j) Ramos, B., & Rojas, F. (2025). En la tesis "Propuesta de mejora en la disponibilidad de camiones subterráneos en una empresa minera aplicando la metodología RCM y la industria 4.0" , se destaca la importancia de la disponibilidad de la maquinaria pesada en el sector minero, un factor determinante para la productividad y el desarrollo económico en países como el Perú. Con el fin de mejorar este indicador y reducir las averías, el estudio analiza la flota de camiones subterráneos (dumpers) de una empresa minera y formula un plan de mantenimiento predictivo que integra tecnologías de la Industria 4.0 como el Internet de las Cosas (IoT) y el aprendizaje automático estructurado a partir de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Inicialmente, el equipo evaluado registraba una disponibilidad del 80 %, con un tiempo medio entre fallas (MTBF) de 55 horas y un tiempo medio de reparación (MTTR) de 8 horas. Al evaluar y validar la propuesta mediante una simulación realizada en el software Arena, los resultados mostraron una mejora significativa: la disponibilidad ascendió al 93% (un incremento del 13%), el MTBF aumentó a 96 horas (un incremento del 75%) y el MTTR disminuyó a 6 horas (una reducción del 25%), respaldando la efectividad del modelo predictivo apoyado en la simulación con Arena.

k) Ölmez Turan, M. (2019). En su tesis "Development of a Dynamic Maintenance Algorithm with Multiple Scenarios: A Case Study for Surface Mining", por la Middle East Technical University, realizó una investigación centrada en desarrollar un algoritmo de

mantenimiento dinámico e integrarlo en un modelo de simulación de eventos discretos con el software Arena, considerando la interacción entre mantenimiento correctivo, preventivo y oportunista frente al comportamiento estocástico de fallas en equipos de minería a tajo abierto.

La simulación permitió evaluar dos escenarios operativos principales: uno con tres palas electromecánicas para medir el efecto de los intervalos de inspección en la producción, y otro con una draglina para optimizar las políticas de mantenimiento y sus costos asociados. Para las palas, se alcanzó una producción anual máxima de $7,266,714 y se determinó que ampliar el intervalo de inspección desplaza el mantenimiento preventivo hacia el correctivo. Para la draglina, se demostró que una política combinada de mantenimiento correctivo y oportunista minimizó el costo total a $913,480, tornando innecesarias las inspecciones preventivas programadas al aprovechar las paradas por falla para intervenir el equipo.

l) Moscoso-Garcia, J., Polo-Arratea, K., Pehovaz-Álvarez, H., y Arauzo, L. (2024). En su artículo "Mathematical Model for Fleet Sizing Using the Match Factor in an Open-Pit Mine", presentado en la 22nd LACCEI International Multi-Conference, realizaron una investigación centrada en la determinación del tamaño óptimo de la flota de acarreo en una mina de cobre a tajo abierto ubicada en Ancash, Perú, utilizando la simulación de eventos discretos en el software Arena.

La simulación virtual permitió modelar el ciclo de carguío y transporte desde la Fase 6 hasta la chancadora primaria, procesando variables estocásticas como tiempos de ciclo, maniobras, carga y capacidades de palas P&H 4100XPC y camiones Komatsu 930E y Cat 793. El objetivo fue evaluar la productividad y requerimientos de flota mediante la comparación de la operación real frente a distintos escenarios alternativos. Como resultado, el modelo logró optimizar el requerimiento promedio de flota de 47.83 camiones por semana en la operación real a 46.83 camiones en el entorno simulado, alcanzando un promedio de productividad de

6,348 t/h y demostrando la capacidad de la simulación para tomar decisiones operativas de bajo costo y sin interrupción del minado.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

a) Medina, X., & Vásquez, J. (2018). En su tesis "Evaluación de la operación de transporte minero usando simulación por eventos discretos en la cantera calizas huayco s.a. ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas – Ecuador" por la Escuela Superior Politécnica del Litoral ,realizaron una investigación en una cantera donde se opera dos frentes de producción al día con una flota de siete volquetes y tres excavadoras, lo que dificulta la logística y la evaluación de alternativas de distribución de maquinaria.

Se llevó a cabo una investigación para crear un modelo de simulación de eventos discretos. Este modelo permitió una evaluación confiable del sistema de carga y transporte utilizando los recursos operativos y existentes de la empresa, sin necesidad de dimensionar la maquinaria ni crear nuevas rutas de transporte.

Se utilizaron distribuciones probabilísticas para simular el modelo en el software Arena Input Analyzer después de recopilar datos de tiempos en el campo. Se analizaron las vías internas de la mina para representar el movimiento de los volquetes mineros durante el ciclo de acarreo, tomando en cuenta las variaciones en cada ciclo. Además, se llevó a cabo un análisis matemático para comparar el modelo de simulación.

Los resultados de la simulación indicaron que de los 140 escenarios evaluados, 24 son los mejores. Además, según el análisis matemático, cada frente de explotación requiere de cuatro volquetes.

b) Lins de Noronha, O., Cano Nuñez, A. E., Dos Reis, A. F. y Arroyo Ortíiz, C. E. (2018). En su artículo de investigación "Dimensionamiento de flota en las operaciones de carguío y transporte usando modelos de simulación de sistemas". Mediante la simulación de

procesos productivos, una investigación desarrollada en una explotación minera brasileña analizó la optimización de la flota de transporte y maquinaria de carguío para proyectar el comportamiento operacional. Esta aproximación metodológica ofrece una perspectiva integrada y sistemática que ayuda a evaluar el rendimiento operativo frente a diferentes circunstancias.

El trabajo señala que cualquier análisis de investigación de operaciones comprende cinco fases esenciales: planteamiento del problema, desarrollo del modelo, resolución, validación y puesta en marcha. Asimismo, al introducir variaciones en las duraciones y los ciclos de recorrido, los escenarios evaluados posibilitaron ajustar la programación de la producción. Mediante el uso de funciones de probabilidad y valores específicos, se calcularon los tiempos operativos de cada fase dentro del ciclo de carga y transporte, logrando un dimensionamiento de carácter tanto analítico como estocástico.

Por otro lado, herramientas como Arena posibilitan el diseño de entornos virtuales que replican con mayor fidelidad las dinámicas productivas reales. Entre los hallazgos principales del análisis comparativo destaca que, a pesar de registrar tiempos de ciclo distintos, el volumen de producción calculado por ambos métodos mantiene su consistencia. En síntesis, esta investigación aporta criterios valiosos para dimensionar la flota de carguío y acarreo en un yacimiento a cielo abierto brasileño, demostrando la utilidad de la simulación para anticipar el comportamiento operativo con duraciones de ciclo que oscilan entre 28 y 53 minutos según la maquinaria empleada.

2.2 Generalidades de la Mina

2.2.1 Ubicación de la Mina

El Proyecto estudiado se localiza en la vertiente suroriental de los Andes peruanos, una región de destacada relevancia en el sector extractivo. Políticamente, el área de operaciones se encuentra distribuida entre los distritos de Chamaca y Livitaca, dentro de la provincia de Chumbivilcas, en el departamento de Cusco.

Desde una perspectiva técnica y cartográfica, el proyecto se encuentra referenciado bajo el cuadrante geológico 29-S. La ubicación precisa de la unidad minera está definida por las coordenadas UTM 201 811 m E y 8 399 875 m N, bajo el datum horizontal PSAD 56 en la zona 19. Este posicionamiento geográfico es determinante para el marco de referencia de las operaciones de diseño, planeamiento de mina y control de los bloques de explotación dentro de la concesión.

2.2.2 Accesibilidad

Las instalaciones se ubican en una zona estratégica que abarca los distritos de Chamaca y Velille, en la provincia de Chumbivilcas, departamento de Cusco. Desde el punto de vista geográfico, el yacimiento se localiza a unos 630 km al sureste de Lima y a 110 km al sur de Cusco (en línea recta), en un entorno de alta montaña con altitudes entre los 3,900 y 4,500 metros sobre el nivel del mar. Estas condiciones geográficas no solo definen el entorno físico, sino que también influyen directamente en el diseño operativo y en la gestión del rendimiento de la flota, debido a la complejidad logística de operar a tales elevaciones.

Para acceder a la zona de operaciones, se cuenta con tres rutas principales que conectan con los centros urbanos más cercanos:

- Ruta desde Cusco (Vía Sicuani): Sigue la ruta Cusco-Urcos-Sicuani, para luego tomar el desvío hacia Yauri y continuar por el camino hacia Velille y Santo Tomás hasta llegar al desvío de Maranniyoc. Este trayecto cubre aproximadamente 310 kilómetros y demanda un tiempo de viaje de unas seis horas.
- Ruta desde Cusco (Vía Livitaca): Esta alternativa parte por la ruta Cusco-Urcos-Combapata, desviándose hacia Yanaoca y Livitaca. Es una ruta más directa, con un recorrido total aproximado de 200 kilómetros.
- Ruta desde Arequipa: Comprende el recorrido Arequipa-Imata-Yauri, continuando hacia el distrito de Velille y Santo Tomás hasta el desvío de Maranniyoc. Cabe señalar que existe transporte directo desde Espinar/Yauri hacia la comunidad de Chilloroya. Este acceso abarca aproximadamente 360 kilómetros de distancia.

2.2.3 Geología

Desde una perspectiva geológica, el proyecto se sitúa estratégicamente en la margen este del Batolito Andahuaylas Yauri, aproximadamente a 3 km al sureste de la antigua mina Katanga.

La columna estratigráfica del área presenta como unidad basal la Formación Chilloroya (Cretácico Inferior), también identificada como Formación Murco. Esta secuencia está compuesta principalmente por areniscas de grano medio en tonalidades blancas, rojas, violetas y grises con intercalaciones de esquistos de barro de color rojizo. Sobre esta unidad, y de manera discordante, se superpone la Formación Arcurquina, correlacionable con la Formación Ferrobamba del Cretácico Superior. Esta última se extiende en una franja de aproximadamente 15 km de largo por 5 km de ancho, conformando una secuencia litológica de calizas, calcarenitas y lentes de conglomerados.

La evolución geológica de la zona se vio marcada por el emplazamiento del Batolito Andahuaylas Yauri durante el Oligoceno. Este complejo plutónico, de composición variable entre diorítica y granodiorítica, está constituido principalmente por plagioclasa, ortoclasa, cuarzo, hornblenda, biotita, apatita, circón y esfeno. La actividad magmática asociada a este batolito favoreció la formación de mantos, vetas y lentes de skarn de magnetita masiva en las zonas de contacto.

Posteriormente, la secuencia litológica fue afectada por intrusiones de rocas ígneas monzoníticas en forma de diques y lacolitos que cortan transversalmente todas las unidades anteriores. Este fenómeno es de vital relevancia económica, ya que, al intruir sobre las calizas, dio lugar a la formación de skarns mineralizados similares a los observados en la mina Katanga y a la generación de cuerpos intrusivos con características típicas de depósitos de pórfido de cobre, tal como se identifica en el Proyecto Constancia.

2.2.3.1 Geología estructural

La geología estructural del Proyecto Constancia ha sido determinante en la preparación del terreno y la localización de la alteración hidrotermal, ejerciendo un control primario sobre la mineralización de cobre, molibdeno, plata y oro, además de influir en la formación de cuerpos de skarn. La dinámica tectónica del área se manifiesta a través de tres sistemas estructurales predominantes que condicionan la distribución del recurso y la competencia del macizo rocoso.

Sistemas Estructurales Principales

- Sistema Noreste (Falla Barita): Es uno de los sistemas más conspicuos en la propiedad. Se caracteriza por un conjunto de fallas de vetas sub-paralelas que transportan sulfatos de metales base y barita. Su presencia es notable en los mapas magnéticos de suelos, donde define cambios topográficos significativos y cortes estructurales en la zona de San José.

- Sistema Norte-Sur (Falla San José): Este conjunto estructural parece ser posterior al sistema de Barita. Su orientación coincide con los diques post-minerales y ejerce un control directo sobre parte del yacimiento San José y la mayor parte de las brechas silicificadas. Se interpreta como un sistema de fallas de tensión vinculado a la evolución del sistema principal.
- Sistema Norte-Noroeste a Sur-Sureste (Falla Yanak): Representa el evento estructural más reciente y de mayor impacto en la integridad del macizo rocoso, generando extensas zonas de salbanda y roca altamente fragmentada.

2.2.3.2 Mineralogía

El yacimiento se define como un sistema de pórfido de cobre-molibdeno que presenta, además, una importante componente de mineralización tipo skarn. Para fines de modelamiento geológico y planeamiento minero, la mineralización ha sido categorizada según su naturaleza y origen:

- Mineralización Hipogénica (Pórfido): Constituye el componente volumétricamente predominante del yacimiento. Se caracteriza por un sistema de pórfido primario, consistente en vetas de cuarzo y diseminaciones de calcopirita-molibdenita con control estructural por diaclasamiento dentro del cuerpo intrusivo. Esta mineralización se extiende principalmente a profundidades mayores a los 3,900 msnm.
- Mineralización de Skarn: Aunque presenta un volumen menor en comparación con el sistema pórfido, se distingue por leyes superiores, localizándose en la superficie o áreas próximas a esta. En los contactos entre intrusivos y calizas, se desarrolla una asociación de granate y magnetita, mientras que en las areniscas calcáreas y arcosas de la Formación Chilloroya predomina la asociación piroxena–diópsido y granate–epidota.

- Zona de Enriquecimiento Supérgeno: Se ubica inmediatamente por debajo de la zona de skarn y, ocasionalmente, como remanentes en la capa lixiviada. Esta zona es crítica para la operación, ya que concentra las leyes más elevadas de cobre, albergando una paragénesis de digenita, covelita y calcocita alojada en el intrusivo.
- Zona de Transición (Mixta): Corresponde a la interfase donde convergen la mineralización supérgena e hipogénica. En este sector coexisten sulfuros de cobre secundarios con calcopirita en la monzonita, representando una unidad clave para el proceso de tratamiento metalúrgico debido a su naturaleza combinada.
- Óxidos de Cobre: Se presentan de forma local y restringida. Debido a su limitada presencia volumétrica y naturaleza superficial, no se consideran de relevancia económica para la actual etapa de desarrollo del proyecto.

2.2.3.3 Estratigrafía

La columna estratigráfica del proyecto tiene como unidad basal a la Formación Chilloroya, una secuencia de sedimentos clásticos compuesta por areniscas de grano medio en tonalidades blancas, rojas, violetas y grises con intercalaciones de lodolitas rojizas. Sobre esta unidad se dispone la Formación Arcurquina (denominada localmente como Formación Ferrobamba), constituida por calizas masivas micríticas de color gris y delgadas capas de lutitas, las cuales afloran en los alrededores del prospecto, especialmente en contacto con los cuerpos intrusivos. Cuando estas calizas interactúan con las rocas intrusivas, se transforman en skarns compuestos por una paragénesis de piroxena-diópsido, granate, magnetita y epidota, con potencial presencia de sulfuros. Estructuralmente, este paquete sedimentario presenta un buzamiento general hacia el sureste, alejándose del núcleo de la monzonita principal.

La identificación de la base de la unidad de caliza es un aspecto crítico para el modelo geológico de Constancia, ya que dicho contacto parece ser homólogo al horizonte favorable

para la formación de skarn observado en la mina Tintaya y otros proyectos relevantes de la región. Asimismo, el potencial mineralógico se extiende a las unidades clásticas subyacentes, como la Formación Murco y, posiblemente, la Formación Hualhuani (conocida localmente como Soraya). Estas unidades, conformadas por areniscas, limolitas y horizontes de cuarcita, actúan como roca hospedante en otros sistemas de cobre del cinturón metalogenético, tal como se observa en los yacimientos Quechua, Antillas y Haquira. En el sector sur de la propiedad, cerca de la aldea Chilloroya, se ha identificado evidencia de mineralización de cobre-oro-molibdeno asociada a estas litologías, las cuales se caracterizan por una coloración ferruginosa debido a la oxidación de pirita diseminada.

Finalmente, el contexto geológico del yacimiento está condicionado por la presencia de depósitos superficiales. Hacia los márgenes norte y este, el área se encuentra cubierta por morenas glaciales que ocultan, en sectores hacia el este, extensiones potencialmente significativas de mineralización de cobre a lo largo de amplias zonas de debilidad estructural.

2.2.4 Método de explotación

Dada la morfología masiva del pórfido de cobre, se optó por el método de bancos múltiples. Esta elección se fundamenta en su capacidad para permitir una extracción sistemática y ordenada. Además de maximizar la productividad, este método resulta clave para mantener la integridad estructural de las paredes del tajo, equilibrando la eficiencia de la operación con las exigencias de estabilidad del yacimiento

2.2.4.1 Características principales

- Geometría del tajo: Configuración escalonada por bancos con dimensiones de 1.6 km por 1.3 km, optimizada bajo criterios de estabilidad geotécnica y rentabilidad económica.
- Altura de bancos: Dimensión operativa nominal de 15 metros.

- Accesibilidad: Sistema de rampas en espiral diseñado para asegurar la circulación eficiente y segura de maquinaria de gran tonelaje.
- Secuencia de minado: Explotación mediante fases (pushbacks) que permite una exposición progresiva del mineral y un control riguroso del stripping ratio, complementado con el manejo estratégico de stocks de baja y mediana ley.

2.2.4.2 Equipos de minado

- Carguío: 3 palas hidráulicas(Hitachi EX5600-6), 2 cargadores frontales(CAT 994H y CAT 994K) y 1 excavadora (Hitachi EX2600-7)
- Acarreo: flota de 33 camiones (23 camiones CAT 793F y 10 camiones Hitachi EH4000AC-3)

2.2.4.3 Ventajas de minado a cielo abierto

- Economía de Escala: Permite el movimiento de grandes volúmenes de material con equipos de alta capacidad (camiones de gran tonelaje, palas eléctricas, etc.), reduciendo significativamente el costo unitario de extracción por tonelada.
- Mayor Productividad: La capacidad de operar en frentes amplios y simultáneos facilita alcanzar tasas de producción mucho más elevadas que en la minería subterránea.
- Flexibilidad Operativa: Facilita la aplicación de técnicas de explotación por fases (pushbacks), permitiendo adaptar el diseño a cambios en el precio del metal, variaciones en el stripping ratio o ajustes en el modelo geológico.
- Seguridad Laboral: Al desarrollarse en superficie, se eliminan los riesgos inherentes al trabajo en espacios confinados, como el control de gases, ventilación compleja o el colapso de techos (derrumbes).

- Optimización del Recurso: Permite la explotación integral de yacimientos masivos de baja ley, donde los métodos subterráneos serían inviables económicamente debido a los altos costos de preparación y fortificación.
- Gestión de Minerales: Facilita la segregación y el manejo de stocks de distintas leyes (baja, media y alta) de manera mucho más simple, permitiendo una mejor planificación en la alimentación de la planta concentradora.

2.2.5 Bases Teóricas

2.2.5.1 ¿Qué es la simulación de sistemas?

Consiste en crear un modelo matemático lógico de un sistema del mundo real y simular su funcionamiento para analizarlo y verificarlo, con la meta de obtener un mayor entendimiento que permita tomar decisiones más informadas.

2.2.5.1.1 Ventajas

- Ideal para comprender cómo afectan los cambios en el proceso.
- Es más rentable simular que modificar la realidad.
- Entendimiento del proceso actual.
- Herramienta de formación.
- Diversidad de software de simulación disponibles para usar.

2.2.5.1.2 Campos y ejemplos de sistemas a simular

- Producción de Piezas
- Embotelladoras
- Restaurantes

- Atención de Reclamos
- Aterrizaje de Aviones
- Producción Textil
- Bancos
- Supermercados
- Tránsito Vehicular
- Hospitales
- Minería
- Inventarios
- Estación de Combustible

2.2.5.2 Fases de un proyecto de simulación

Las fases de un proyecto de simulación son etapas fundamentales que delinean el trayecto hacia la comprensión y resolución de problemas complejos. Desde la definición de objetivos hasta la presentación de resultados, estas fases proporcionan un marco estructurado para abordar la complejidad y obtener conclusiones significativas.

- Definir problema y objetivos
- Modelo conceptual
- Obtención y Análisis estadístico de datos
- Construir el simulador
- Verificación y Validación

- Experimentos en el simulador

- Presentación de Resultados

2.2.5.3 Tipos de simulación

2.2.5.3.1 Simulación Discreta

Se refiere a un tipo de simulación en la que los eventos ocurren en momentos específicos y discretos en el tiempo, lo que lleva a la actualización de los valores de las variables del modelo. Esta es la simulación que utilizaremos principalmente por ejemplo los arribos al frente de minado, la salida de un camion de un frente, ingreso a cola en frentes, etc.

2.2.5.3.2 Simulación Continua

Se trata de un tipo de simulación donde las variables del modelo experimentan cambios de manera continua a lo largo del tiempo en función de su estado por ejemplo la temperatura en el transcurso del día, el funcionamiento de un tanque de gasolina en una estación de combustible.

2.2.5.4 Elementos de un sistema a simular

En el análisis de sistemas, elementos como entidades, actividades, recursos, atributos y variables se entrelazan para comprender su funcionamiento. Desde las entidades que atraviesan el sistema hasta las actividades llevadas a cabo, respaldadas por recursos diversos, cada elemento aporta detalles únicos. Estos componentes, combinados con variables y métricas clave, son fundamentales para entender el desempeño y la dinámica de un sistema.

2.2.5.4.1 Entidades

Son los elementos que atraviesan el sistema para ser procesados o recibir un servicio. Se dividen en:

- Seres humanos o animados: como clientes, pacientes o vehículos.

- Elementos inanimados: tales como productos, piezas o documentos.

- Conceptos intangibles: como llamadas, solicitudes, correos o proyectos.

2.2.5.4.2 Actividades

Son las actividades llevadas a cabo dentro de un sistema y pueden implicar el procesamiento de las entidades. Por lo general, se relacionan con una variable aleatoria y el uso de recursos. Se dividen en:

- Procesamiento de entidades: como cortar, hornear, brindar servicios, atención al cliente o pintar.

- Movimiento: como el transporte en un elevador.

- Ajustes y mantenimiento: como la configuración de una máquina.

2.2.5.4.3 Recursos

Se refieren a los recursos necesarios para llevar a cabo las actividades, ofreciendo respaldo mediante maquinaria, equipos y personal. Estos recursos pueden ser:

- Humanos o animados, como operadores o personal.

- Inanimados, como equipos, herramientas, dinero o espacio.

- Intangibles, como información, tiempo o energía eléctrica.

2.2.5.4.4 Atributos

Se refieren a variables vinculadas únicamente a las entidades, guardando valores o datos específicos de cada una. Estas características distinguen a cada entidad, ofreciendo información

única que la distingue de otras. Algunos ejemplos incluyen peso, edad, tamaño, hora de llegada, prioridad o tipo.

2.2.5.4.5 Variables globales

Estas variables se emplean en el modelo de simulación para representar información que refleja alguna característica del sistema en análisis. A diferencia de las variables asociadas a entidades particulares, estas no se vinculan con una entidad específica. Algunos ejemplos son acumuladores, número atendido, costos o ingresos.

2.2.5.4.6 Variables aleatorias

Estas variables están ligadas a las acciones dentro del sistema, como las entradas y salidas hacia el proceso o sistema. Pueden seguir distribuciones aleatorias o discretas y se manifiestan en:

- Intervalos de tiempo entre llegadas.
- Número de llegadas o demandas.
- Duración de servicios o ejecución de cada actividad.
- Probabilidades de tipos de clientes o productos.
- Probabilidad de bifurcación.

2.2.5.4.7 Indicadores del sistema

Se trata de indicadores clave de rendimiento que nos permiten analizar el desempeño o la conducta de un sistema. Estos KPI incluyen:

- Tiempo de ciclo y tiempo en el sistema.
- Longitud de la cola y tiempo de espera en la cola.

- Número de clientes atendidos, reprocesados, ingresados, capacidad de producción.

- Utilización de recursos.

- OEE (Eficiencia General de los Equipos), tiempo de vida, ingresos totales y costos.

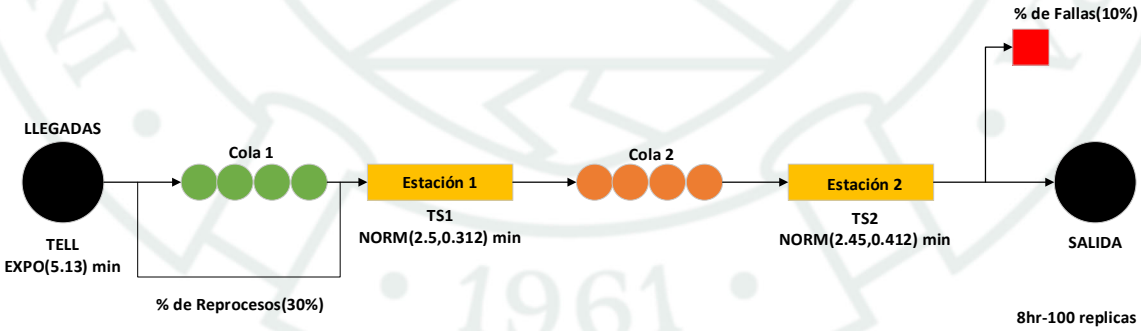
2.2.5.5 Representación esquemática de simulaciones de sistema

La representación esquemática en las simulaciones de sistema es un recurso invaluable para comprender la complejidad y dinámica de un entorno simulado. Estos esquemas, como mapas visuales, capturan la esencia del sistema, mostrando interacciones, flujos y relaciones clave entre elementos. Permiten una comprensión intuitiva y estructurada, sirviendo como herramientas esenciales para analizar y comunicar el comportamiento de sistemas complejos de manera clara y concisa. A continuación, se muestran algunos ejemplos de esquematización:

- Sistema de producción en serie

Figura 1

Esquematización de un sistema de producción en serie

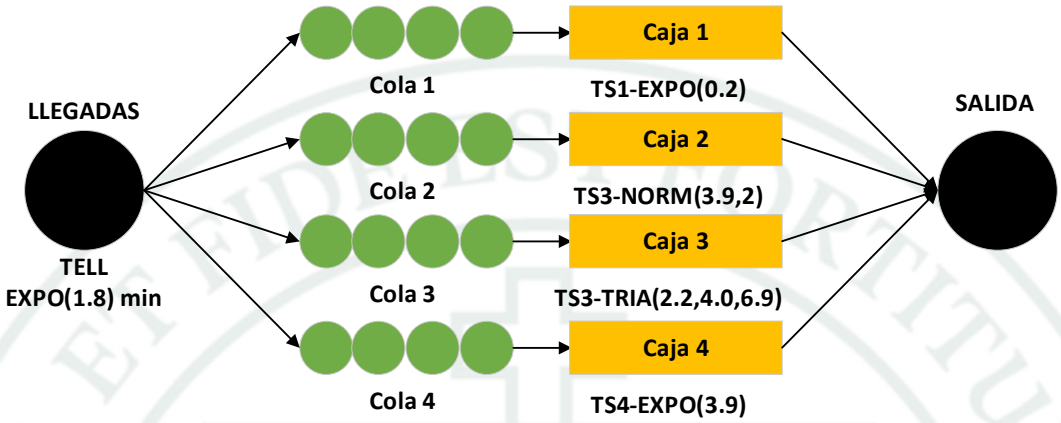


Nota: Elaboración propia

• Varias colas y servidores

Figura 2

Esquematización de varias colas y servidores

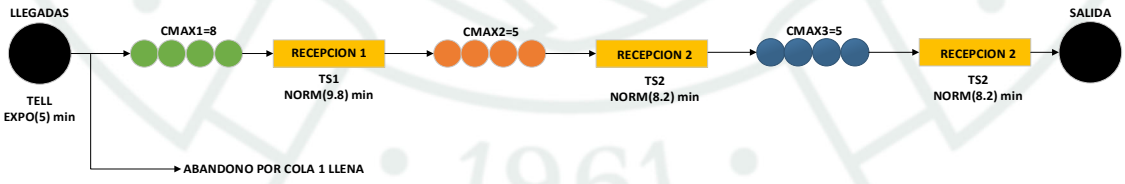


Nota: Elaboración propia

• Cola máxima-serie-abandonos

Figura 3

Esquematización de cola máxima-serie-abandonos



Nota: Elaboración propia

2.2.5.6 Software arena

Desarrollado por Rockwell Automation, Arena es una plataforma de simulación basada en eventos discretos empleada para estudiar y modelar sistemas complejos en sectores diversos, tales como la logística, la manufactura, los servicios y el ámbito sanitario. Su entorno gráfico intuitivo permite construir representaciones visuales detalladas de los flujos de trabajo, ejecutar simulaciones operativas y analizar múltiples alternativas para optimizar la productividad, la eficiencia y los procesos de toma de decisiones.

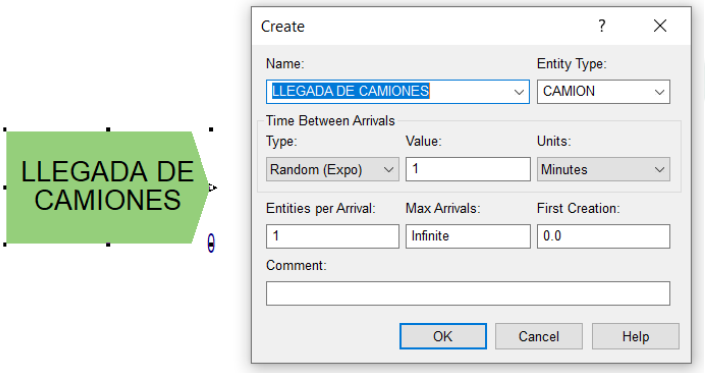
2.2.5.7 Módulos básicos en arena

2.2.5.7.1 Módulo Create

Módulo que da inicio al flujo de entidades en el sistema mediante la generación de llegadas (individuales o múltiples). En el contexto minero, se utiliza típicamente para simular el inicio de la extracción de mineral, la recepción de documentos administrativos o el arribo de camiones al área de carga.

Figura 4

Módulo Create



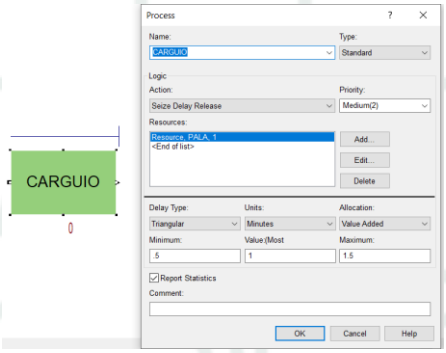
Nota: Extraído del software Arena

2.2.5.7.2 Módulo Process

Componente central del modelo donde la entidad requiere recursos, experimenta una duración determinada y los libera al finalizar la tarea. En la operación minera se emplea para modelar actividades como la ejecución de labores, el procesamiento de órdenes de extracción, la clasificación o transporte de material, y los tiempos de espera o retrasos.

Figura 5

Módulo Process



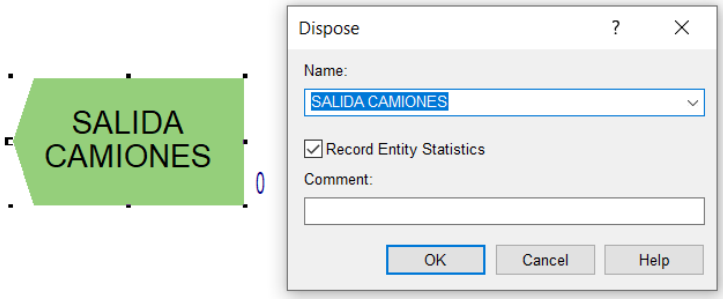
Nota: Extraído del software Arena

2.2.5.7.3 Módulo Dispose

Componente que marca el punto final de salida de las entidades del sistema de simulación. En el ámbito minero, se utiliza habitualmente para modelar la salida de volquetes del sistema de producción, la conclusión de procesos administrativos o el egreso de equipos auxiliares.

Figura 6

Módulo Dispose



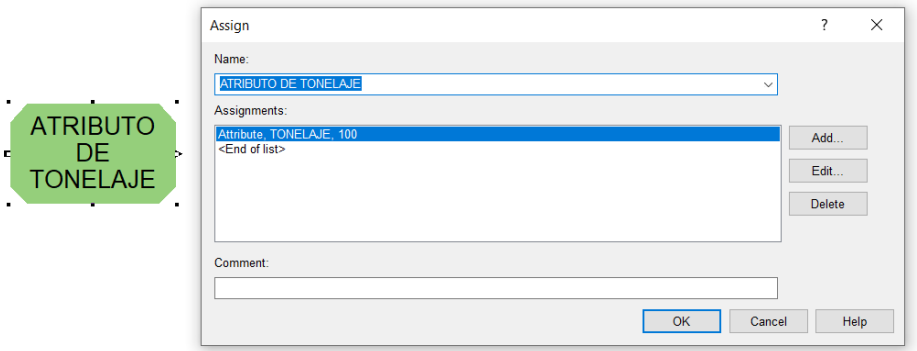
Nota: Extraído del software Arena

2.2.5.7.4 Módulo Assign

Componente utilizado para actualizar o definir valores en variables, atributos, tipos o imágenes de entidades dentro del sistema, permitiendo múltiples asignaciones simultáneas. En el contexto minero, se emplea habitualmente para registrar lotes de producción, modificar tipos de entidad, fijar horas de llegada, establecer tiempos de actividades y calcular costos, ingresos o variables de rendimiento.

Figura 7

Módulo Assign



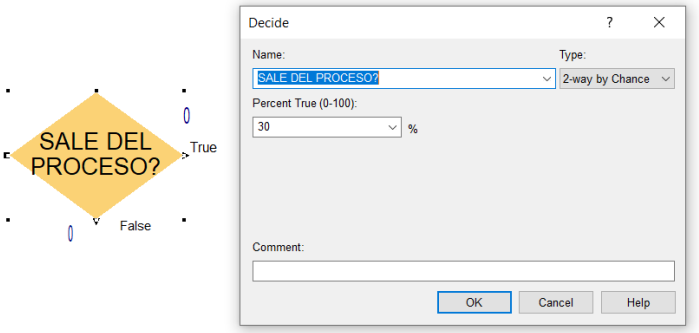
Nota: Extraído del software Arena

2.2.5.7.5 Módulo Decide

Componente encargado de ejecutar bifurcaciones o decisiones lógicas en el sistema según condiciones basadas en atributos, variables, tipos de entidad o expresiones. En el contexto minero, se emplea habitualmente para priorizar rutas de entidades, clasificar tipos de material o evaluar si una entidad continúa su ciclo o abandona el sistema.

Figura 8

Módulo Decide



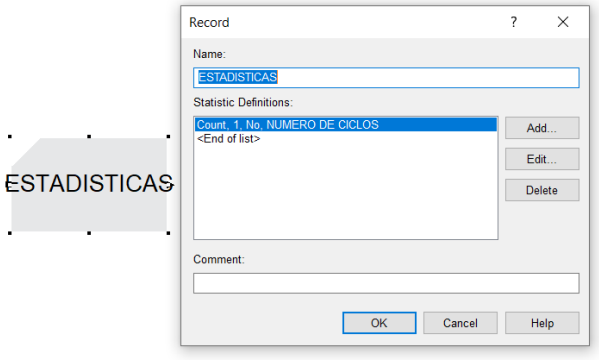
Nota: Extraído del software Arena

2.2.5.7.6 Módulo Record

Componente empleado para recopilar datos estadísticos y métricas dentro del modelo de simulación, ofreciendo observaciones de intervalos, estadísticas de entidades, tiempos entre salidas y registros mediante contadores.

Figura 9

Módulo Record



Nota: Extraído del software Arena

2.2.6 Definiciones

2.2.6.1 Modelo Determinístico

Representación matemática de un sistema donde los resultados son predecibles con exactitud, ya que no consideran la variabilidad ni la incertidumbre; utilizan valores promedio estáticos como entradas de datos.

2.2.6.2 Modelo Estocástico

Sistema de simulación que incorpora variables aleatorias y distribuciones de probabilidad para modelar procesos del mundo real, permitiendo capturar la variabilidad e incertidumbre inherente a las operaciones mineras.

2.2.6.3 Simulación de Eventos Discretos (SED)

Técnica computacional que modela el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo, donde los cambios en el estado del sistema ocurren en puntos específicos y discretos, permitiendo analizar la interacción entre recursos, entidades y actividades.

2.2.6.4 Ciclo de Carguío y Acarreo

Proceso operativo crítico en minería a cielo abierto que comprende la secuencia de carga del material en la pala, el transporte hacia el destino, la descarga y el retorno del equipo de transporte al frente de minado.

2.2.6.5 Modelo de Simulación Estocástica del Sistema

Representación computacional dinámica del sistema físico de carguío y acarreo, estructurada a partir de distribuciones probabilísticas y datos históricos operacionales. Permite evaluar experimentalmente diversos escenarios operativos y proyectar el desempeño del sistema real considerando la aleatoriedad de sus componentes

2.2.6.6 Stripping Ratio (Relación Estéril/Mineral)

Indicador operativo que define la cantidad de material estéril que debe ser removido para exponer una unidad de mineral; su control riguroso es vital para la sostenibilidad económica de la operación.

2.2.6.7 Cuello de Botella

Punto crítico en el flujo del proceso donde la capacidad es insuficiente para procesar la demanda que llega, limitando la productividad global del sistema.

2.2.6.8 Pushback (Fase de Minado)

Estrategia de explotación que segmenta el tajo en fases o etapas progresivas, permitiendo gestionar de manera eficiente la exposición del mineral y optimizar la secuencia de minado a mediano y largo plazo.

2.2.6.9 KPI

Métricas cuantitativas utilizadas para evaluar el desempeño y la eficacia de un proceso minero, como la disponibilidad de equipos, el tiempo de ciclo y la utilización de la flota.

2.2.6.10 Productividad de Carguío

Capacidad operativa de los equipos de carga (palas, cargadores o excavadoras) para transferir el material a las unidades de transporte en un tiempo de ciclo optimizado. Este parámetro integra las fases críticas del proceso: el tiempo de posicionamiento (spotting), el tiempo de carguío (loading) y el tiempo de espera (hang), determinando así la eficiencia real de la unidad de carga.

2.2.6.11 Sinceramiento de la Productividad

Procedimiento de ajuste metodológico sustentado en la simulación estocástica de eventos discretos, el cual corrige los sesgos de las estimaciones determinísticas para determinar el rendimiento técnicamente alcanzable por el sistema.

2.2.6.12 Precisión del Planeamiento

Medida cuantitativa de convergencia (evaluada mediante el porcentaje de error relativo) entre el tonelaje proyectado en los planes de minado de mediano plazo y la producción real ejecutada.

CAPITULO III:

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Alcances y Limitaciones

3.1.1 Alcances

El alcance de esta investigación abarca el análisis técnico del ciclo de carguío y acarreo para las áreas de operaciones y planeamiento de mediano plazo en una mina a tajo abierto del sur del Perú. El estudio se limita al desarrollo y validación de un modelo de simulación de eventos discretos destinado a determinar la productividad real del carguío como imput primario para los planes de minado. Frente a las metodologías convencionales sustentadas en promedios determinísticos, esta propuesta acota su análisis al sinceramiento de la productividad y la mitigación de la incertidumbre mediante la modelación de la variabilidad del sistema, optimizando la eficiencia de la flota existente sin abarcar la implementación ni adquisición de nueva infraestructura de despacho.

3.1.2 Limitaciones

La principal limitación es la versión del software utilizado, ya que Arena v.16.1 se utiliza en su versión para estudiantes, que se puede descargar fácilmente en su página web y es amplia y suficiente para la investigación. Sin embargo, si se desea un análisis con una mayor capacidad de procesamiento de datos, se puede adquirir una licencia que nos brinda más opciones.

3.2 Tipo y Nivel de Investigación

Para proponer una solución práctica al diseño del modelo en arena para el proceso de carguío y acarreo, se necesitará calcular las variables del sistema. Esto hace que la investigación sea de tipo aplicado y tenga un enfoque descriptivo y correlacional.

3.3 Hipótesis de Investigación

3.3.1 Hipótesis General

El desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos permite sincerar los parámetros de productividad en el ciclo de carguío y acarreo mediante la integración de variables estocásticas, lo que reduce la incertidumbre operativa y permite una mejora significativa en la precisión del planeamiento de mediano plazo en una unidad minera a tajo abierto del sur del Perú.

3.4 Variables

3.4.1 Variables Independientes

La variable independiente representa la condición, factor o parámetro que el investigador modifica o administra de forma deliberada con el objetivo de evaluar sus repercusiones sobre otro fenómeno de estudio. Dentro del diseño experimental, constituye la variable explicativa o causa cuya variación permite comprobar la existencia de una relación directa frente a los cambios en la variable dependiente.

VI: Parámetros operativos de carguío y acarreo (Dimensión de la flota de camiones, tiempos unitarios de maniobra/carguío/descarga, programación de estados (Horas operativas, Horas en standby, Horas de demora, Horas de mantenimiento), criterios de despacho de frentes y secuenciamiento futuro.

3.4.2 Variables Dependientes

La variable dependiente hace referencia al fenómeno, respuesta o indicador que se cuantifica para examinar el impacto generado por las modificaciones de la variable independiente. En tal sentido, refleja las consecuencias o los resultados observados, encontrándose subordinada a las condiciones

VD: Productividad futura sincerada del sistema de carguío y acarreo (Productividad por equipo de carguío en ton/hr, tonelaje total descargado por destino, tiempo de ciclo)

3.5 Población y Muestra o Universo

3.5.1 Población

La población está constituida por la totalidad de los eventos y ciclos de operación (tiempos de carga, tiempos de transporte, tiempos de descarga y tiempos de espera) realizados por la flota de carguío y acarreo (6 equipos de carguío y 33 camiones mineros) en la unidad minera durante el período de estudio correspondiente al año 2026.

3.5.2 Muestra

Para garantizar la validez metodológica y la independencia estadística entre la fase de calibración y la fase de validación del simulador, la muestra de datos históricos extraída del sistema Dispatch se dividió estrictamente en dos conjuntos independientes:

- Conjunto de Datos de Calibración: Conformado por los registros históricos continuos de los meses de enero y febrero (representativos de la época húmeda) y mayo y junio (representativos de la época seca) del año 2026. Esta base comprende más de 100,000 ciclos operativos y se destinó exclusivamente al procesamiento en el módulo Input Analyzer para la parametrización de las distribuciones de probabilidad de los tiempos fijos.
- Conjunto de Datos de Validación Independiente: Conformado por cuatro (4) días operativos completos e independientes que fueron excluidos intencionalmente y en su totalidad de la muestra de calibración:

- Época Húmeda: 4 de enero de 2026 y 6 de febrero de 2026.
- Época Seca: 15 de mayo de 2026 y 20 de junio de 2026.

3.6 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.6.1 Método de Investigación

Cuantitativo, de nivel explicativo y predictivo, aplicado mediante simulación por eventos discretos (SED)

3.6.2 Técnicas de Recolección de Datos

- Revisión documental y extracción de datos operativos: Análisis de registros históricos de dispatch, tiempos de ciclo de acarreo y carguío.
- Ajuste de distribuciones de probabilidad: Análisis estadístico para caracterizar la estocasticidad de los tiempos de viaje, maniobras y paradas mecánicas.
- Simulación por eventos discretos: Modelado estocástico y dinámico de la red de transporte y frentes de carguío en entorno computacional.
- Juicio de expertos y validación técnica: Entrevistas y mesas de trabajo con el personal de operaciones y planeamiento de minado para corroborar la lógica de despacho, restricciones y tasas de productividad obtenidas.

3.6.3 Instrumentos de Recolección de Datos

- Bases de datos operativas y topográficas consolidadas (Excel/CSV): Matriz integrada de datos de entrada conformada por registros históricos de tiempos de ciclo unitarios, paradas programadas/no programadas y payloads por camión extraídos del sistema de monitoreo de flota (Dispatch), complementada con los perfiles de transporte, distancias

reales de acarreo y distancias planas equivalentes (Equivalent Flat Haul - EFH) modeladas y exportadas mediante el software de planeamiento minero MinePlan Haulage.

- Software Input Analyzer (Rockwell Arena): Herramienta estadística para la identificación y parametrización de las funciones de densidad de probabilidad de los datos de entrada.
- Modelo de simulación en Rockwell Arena: Instrumento informático (archivos .doe, .mod y .exp) que representa la arquitectura lógica del circuito de carguío y acarreo.
- Módulos de reporte y consolidadores de salida (Output Analyzer / Excel): Hojas de cálculo estructuradas para el procesamiento de los KPIs de respuesta (productividad sincerada, colas y tonelajes acumulados por destino y equipo).

3.7 Plan de Análisis de los Datos

3.7.1 Técnicas de Análisis de Datos

Para el procesamiento y análisis de la información de esta investigación se utilizarán modulo de Rockwell Arena (Input Analyzer) y Microsoft Excel, debido a su robustez computacional, capacidad estadística e integración para el modelado estocástico. El análisis contempla la evaluación de los registros históricos de carguío y acarreo extraídos del sistema Dispatch y los perfiles de transporte de MinePlan Haulage, comparando las metas nominales/teóricas de planeamiento frente a la productividad real sincerada obtenida mediante las corridas de simulación por eventos discretos. Los datos e indicadores necesarios para el análisis incluyen:

- Tiempos unitarios del ciclo de minado (maniobra, carguío, acarreo lleno, descarga y retorno vacío en minutos).
- Payload o tonelaje efectivo por camión y capacidad nominal.

- Tiempos de mantenimiento de los equipos de carguío.
- Distancias de acarreo y distancias planas equivalentes (EFH) por destino.
- Productividad sincerada por equipo de carguío.
- Tonelaje total acumulado por destino (Crusher, WRF, TMF y Stock).
- Tonelaje desglosado por equipo de origen

Los datos e indicadores resultantes serán consolidados en tablas y matriz de salidas, lo que permitirá observar:

- Brecha operativa entre la productividad teórica de planeamiento y la productividad real sincerada del sistema.
- Nivel de utilización y cuellos de botella generados en los frentes de carguío y puntos de descarga.
- Distribución del tonelaje movido desglosado por destino y equipo de carguío origen.

Se aplicará estadística descriptiva (medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza al 95%) sobre las réplicas de simulación para validar la convergencia del modelo. Asimismo, se empleará la prueba t-Student para muestras emparejadas con el propósito de evaluar la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre los rendimientos teóricos asumidos por planeamiento y los valores sincerados por la simulación.

El análisis se complementará con histogramas de frecuencia de tiempos de ciclo y gráficos de barras apiladas por equipo y destino, facilitando la visualización del impacto de la variabilidad operativa sobre las metas de producción.

3.7.2 Sustento Estadístico y Justificación Metodológica del Ajuste de Distribuciones

Para la caracterización estocástica de los tiempos fijos de ciclo, los datos extraídos del sistema Dispatch se analizaron mediante la herramienta Input Analyzer de Rockwell Arena. La evaluación formal de las funciones de probabilidad candidatas se realizó mediante las pruebas estadísticas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov para variables continuas y Chi-Cuadrado.

La selección y validación de cada función de densidad de probabilidad se fundamentó en los siguientes criterios estadísticos:

1. Pruebas de Bondad de Ajuste y p-value: Se registraron los estadísticos de prueba y se verificó que los valores de significancia superaran el umbral estándar, confirmando la validez del ajuste probabilístico.

2. Minimización del Error Cuadrático (Square Error): Se priorizaron aquellas funciones con el menor valor de error cuadrático acumulado frente al histograma empírico.

3. Ajuste Gráfico y Truncamiento Operativo: Para asegurar tiempos operativos estrictamente positivos, las distribuciones conservadas por su óptimo ajuste estadístico se programaron en Arena usando la función de truncamiento mayores a 0 (MAX(0.01, Distribución)). Esto asigna un tiempo mínimo de 0.01 ante cualquier valor teórico menor o igual a cero, evitando tiempos negativos sin alterar la variabilidad real.

3.8 Configuración de Parámetros de Simulación y Réplicas en Arena

Para la ejecución experimental del modelo de simulación de eventos discretos en Rockwell Arena, se establecieron las siguientes condiciones técnicas de simulación:

- Duración de la Corrida: Se fijó en 24 horas continuas (1,440 minutos) por réplica, lo cual representa una jornada diaria completa compuesta por dos turnos de trabajo de 12 horas.
- Criterio de Finalización: La corrida se detiene automáticamente al alcanzar el límite de tiempo de simulación (t = 1,440 min), deteniendo la generación de entidades y procesando el tonelaje acumulado.
- Tratamiento de Semillas: Se habilitó la asignación de secuencias de semillas aleatorias independientes para cada corrida, garantizando la no correlación estadística entre las 100 réplicas.
- Periodo de Calentamiento: Se definió en 0 minutos, debido a que el modelo simula el inicio real de la jornada diaria desde bahías tras el cambio de guardia. La fase estacionaria se alcanza en los primeros 30 minutos, con un impacto menor al 0.3% en el tonelaje global.
- Criterio de Suficiencia del Número de Réplicas: Se determinó en 100 réplicas debido a que a partir de las 80 corridas la varianza muestral se estabiliza, logrando un error estándar inferior al 0.1% y garantizando la convergencia del tonelaje simulado.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Descripción del sistema a modelar

El sistema de minado opera con una flota total de 6 equipos de carguío (3 palas, 2 cargadores frontales y 1 excavadora) y 33 equipos de acarreo (camiones). De esta flota, entre 2 y 3 camiones ingresan diariamente a mantenimiento preventivo programado, manteniendo una disponibilidad operativa en pista de 30 a 31 camiones, los cuales se someten a una inspección diaria de 30 minutos según la dinámica de la operación.

La jornada laboral se organiza en dos guardias de 12 horas (Día/Noche, de 07:00 a 19:00 h) e inicia formalmente en la zona de bahías con el cambio de guardia. Tras el relevo, el sistema de despacho asigna entre 8 y 9 camiones a las palas, distribuyendo las unidades remanentes según los requerimientos operativos del plan de minado.

4.1.1 Estacionalidad y Movimiento de Materiales

Para el análisis y modelación operativa, la unidad minera se segrega en periodos trimestrales (quarters): el Q1 y Q4 corresponden a la época húmeda, mientras que el Q2 y Q3 definen la época seca. Bajo este esquema de estacionalidad, el movimiento total promedio alcanza las 230 kt/día, distribuido en los siguientes destinos:

- Presa de Relaves (TMF): 40 kt/día de desmonte.
- Chancadora Primaria: 90 kt/día de mineral.
- Botadero de Desmonte (WRF) y Stockpiles: 100 kt/día restantes. De los 4 acopios disponibles, el Stock LG es el más utilizado debido a su mayor capacidad de almacenamiento.

De manera excepcional durante el presente año, la operación incluye remanejos tanto de mineral como de desmonte (este último requerido para la gestión y cobertura de material NAG).

Las productividades nominales de carguío consideradas corresponden a:

- Palas: 3,000 t/h
- Cargadores frontales: 2,000 t/h
- Excavadoras: 1,000 t/h

4.1.2 Estructura de los Ciclos Operativos (Carguío y Acarreo)

Para la caracterización del ciclo de transporte y carguío dentro del modelo de simulación, se consideran los siguientes componentes discretos de tiempo:

Ciclo de Acarreo:

Tiempos Variables:

- Tiempo de viaje cargado (travel loaded).
- Tiempo de viaje vacío (travel empty).

Tiempos Fijos:

- Tiempo de acuadre en el frente.
- Tiempo de acomodo/posicionamiento en el frente.
- Tiempo de maniobra y retroceso en la zona de descarga.
- Tiempo de descarga (dumping time).

Ciclo de Carguío:

- Tiempo de cuadre (spot time).
- Tiempo neto de carguío (loading time).
- Tiempo de espera (hang time)

Este ciclo continuo de carguío, acarreo, descarga y retorno se mantiene durante las 12 horas del turno hasta el siguiente cambio de guardia en bahías, punto en el cual se reasignan las unidades y se reinicia el flujo operativo.

4.2 Recolección y análisis de datos

Los datos operativos se extrajeron de la base de datos del sistema de Dispatch de la unidad minera, abarcando registros representativos tanto para la época húmeda como para la época seca. Esta base de datos cuenta con miles de registros históricos que son capturados y almacenados en hojas de cálculo (Excel) a partir de los marcajes de estado y tiempos de inicio registrados por los operadores y el despachador de turno.

4.2.1 Determinación de Distribuciones de Probabilidad para Tiempos Fijos

Para cada variable procesada en Input Analyzer, se evaluaron los estadísticos de las pruebas Chi-Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov , junto con sus respectivos p-values. La selección final combinó la minimización del estadístico de prueba y del Error Cuadrático , respaldada por la validación gráfica del ajuste sobre el histograma empírico de frecuencias. Los tiempos fijos analizados e introducidos al modelo mediante este procedimiento corresponden a:

Ciclo de Acarreo:

- Tiempo de cuadre en el frente.
- Tiempo de acomodo/posicionamiento en el frente.
- Tiempo de maniobra y retroceso en la zona de descarga.
- Tiempo de descarga (dumping time).

Ciclo de Carguío:

- Tiempo de acomodo (spot time).
- Tiempo neto de carguío (loading time).

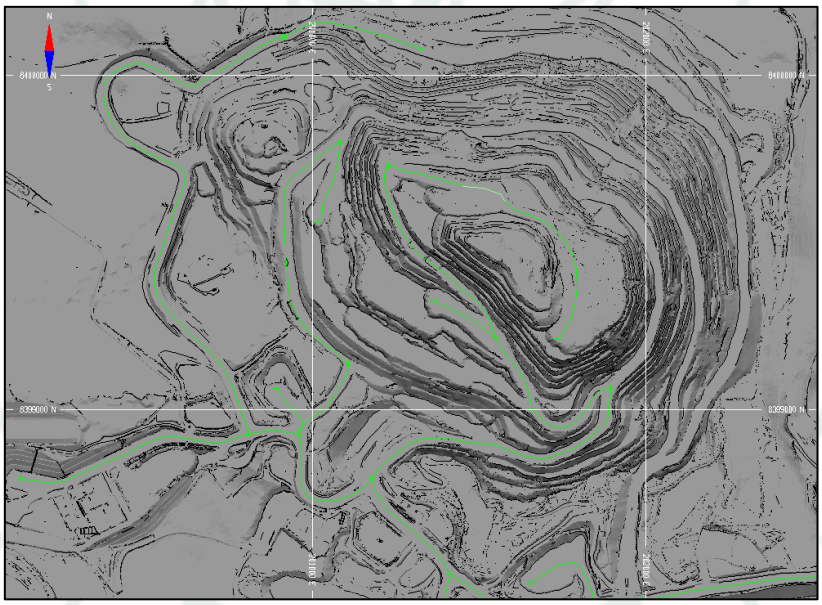
4.2.2 Estimación de Tiempos Variables mediante MinePlan

Para la determinación de los tiempos variables de acarreo (viaje cargado y viaje vacío), se utilizó el módulo Haulage del software MinePlan. La metodología consistió en:

- **Segmentación de Rutas:** Se trazaron y distribuyeron las rutas de acarreo según la matriz origen-destino de la operación.

Figura 10

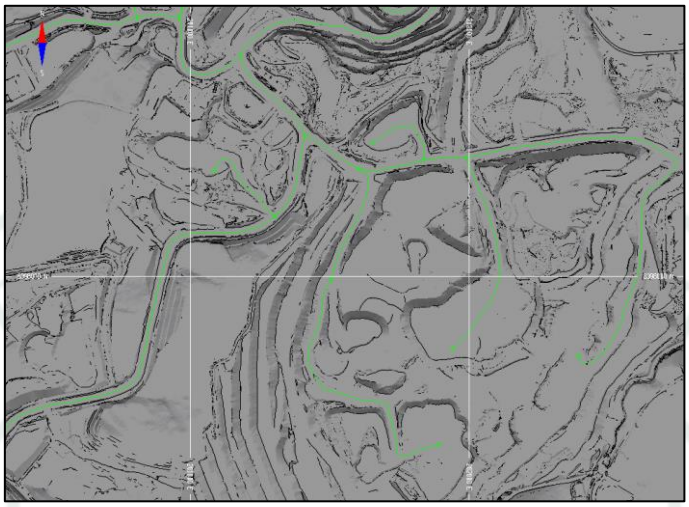
Rutas en Haulage correspondientes al tajo y chancadora



Nota: Extraído del software Mineplan

Figura 11

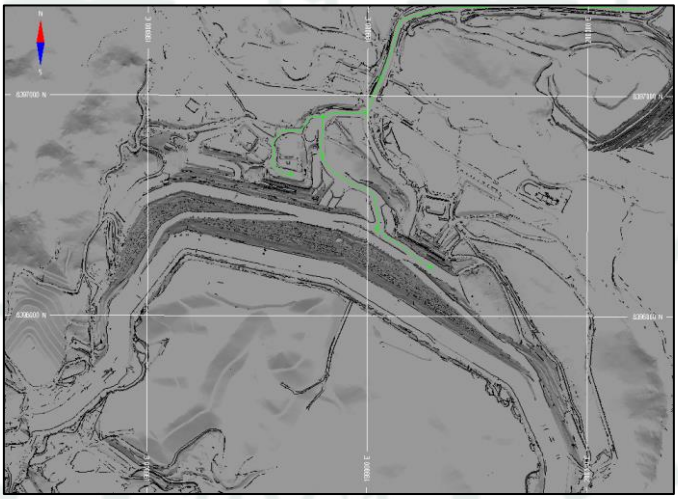
Rutas en Haulage correspondientes al WRF



Nota: Extraído del software Mineplan

Figura 12

Rutas en Haulage correspondientes al TMF



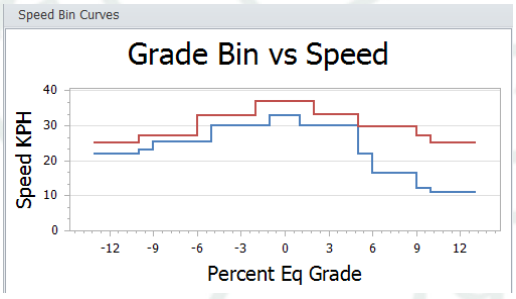
Nota: Extraído del software Mineplan

- **Cálculo de Distancia Horizontal Equivalente (EFH):** Se determinó la Equivalent Flat Haul (EFH) para cada tramo, considerando la distancia física y las pendientes de la vía.

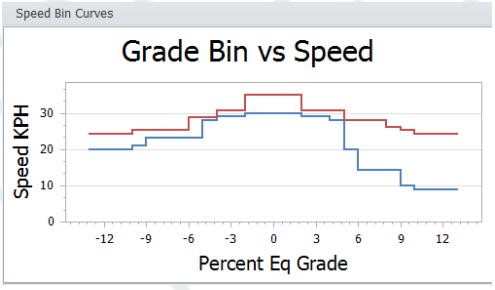
Figura 13

Curvas de velocidad para calculo de EFH en época húmeda y seca

Eq Grade Bin ▲	Loaded Speed	Unloaded Speed
-11.00	22.00	25.20
-10.00	22.00	25.20
-9.00	23.10	27.00
-8.00	25.30	27.00
-7.00	25.30	27.00
-6.00	25.30	27.00
-5.00	25.30	33.00
-4.00	30.00	33.00
-3.00	30.00	33.00
-2.00	30.00	33.00
-1.00	30.00	37.00
0.00	33.00	37.00
1.00	30.00	37.00
2.00	30.00	33.30
3.00	30.00	33.30
4.00	30.00	33.30
5.00	22.00	29.70
6.00	16.50	29.70
7.00	16.50	29.70
8.00	16.50	29.70
9.00	12.10	27.00
10.00	11.00	25.20
11.00	11.00	25.20
12.00	11.00	25.20



Eq Grade Bin ▲	Loaded Speed	Unloaded Speed
-12.00	19.80	24.30
-11.00	19.80	24.30
-10.00	19.80	24.30
-9.00	20.90	25.20
-8.00	23.10	25.20
-7.00	23.10	25.20
-6.00	23.10	25.20
-5.00	23.10	28.80
-4.00	28.00	28.80
-3.00	29.00	30.60
-2.00	29.00	30.60
-1.00	30.00	35.00
0.00	30.00	35.00
1.00	30.00	35.00
2.00	29.00	30.60
3.00	29.00	30.60
4.00	28.00	30.60
5.00	19.80	27.90
6.00	14.30	27.90
7.00	14.30	27.90
8.00	14.30	26.10
9.00	9.90	25.20
10.00	8.80	24.30
11.00	8.80	24.30
12.00	8.80	24.30



Nota: Extraído del software Mineplan, modulo Haulga

- **Determinación de Tiempos de Viaje:** La distancia EFH se dividió entre la velocidad nominal del equipo a pendiente cero, diferenciando las velocidades según la estacionalidad (época húmeda o seca) para obtener los tiempos de tránsito variables por ruta, como se detalla a continuación:

$$Tiempo\ viajando\ vacio(\text{min}) = \frac{EFH\ VACIO(KM)}{VELOCIDAD\ VACIO\ EN\ 0\%(\frac{KM}{HR})} * 60$$

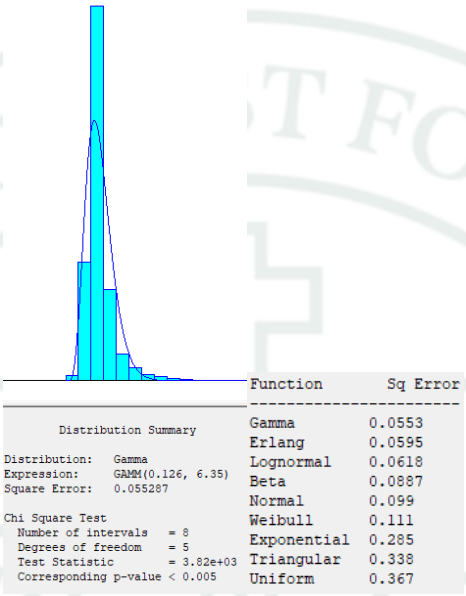
$$Tiempo\ viajando\ cargado(\text{min}) = \frac{EFH\ CARGADO(KM)}{VELOCIDAD\ CARGADO\ EN\ 0\%(\frac{KM}{HR})} * 60$$

4.2.3 Análisis de datos

Para cada variable del ciclo operativo evaluada en Input Analyzer , el ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad se validó formalmente mediante las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrado .Se verificó que los valores de significancia resultantes superaran el umbral estadístico estándar , confirmando la aceptación del ajuste probabilístico. La selección definitiva de cada función combinó el cumplimiento de las pruebas de hipótesis con la minimización del Error Cuadrático y una adecuada correspondencia gráfica respecto al histograma empírico de frecuencias.

Figura 14

Ejemplificación de distribución en imput analizar y su Sq error



Nota: Extraído del software Arena, modulo Imput Analizer

Posteriormente, los datos recopilados se caracterizaron mediante distribuciones de probabilidad teóricas. Este procedimiento de ajuste se aplicó a las distintas etapas del ciclo de carguío y acarreo, así como al proceso de descarga en la chancadora primaria. Este último elemento se modeló bajo el mismo criterio debido a la formación de colas de espera (queuing system) generadas por la llegada aleatoria de los camiones, en analogía con la dinámica observada en los frentes de carguío.

Tabla 1

Ajuste de distribuciones de probabilidad para los tiempos de ciclo en época húmeda

EPOCA HUMEDA								
ACTIVIDAD	**EQUIPOS**	**Tipo de tiempo**	**N° Datos**	**Distribución**	**Expresión**	**Sq. error**	**P-value K-S**	**P-value X^2**
CARGUIO	PALAS	Tiempo de acomodo (spot time).	15641	Beta	16 * BETA(3.83, 31.6)	0.001349	> 0.15	> 0.11
		Tiempo de carguío (loading time).	60605	Beta	12 * BETA(17.9, 72.3)	0.002794	> 0.15	> 0.10
CARGUIO	CARGADORES	Tiempo de acomodo (spot time).	15641	Beta	16 * BETA(3.83, 31.6)	0.001349	> 0.15	> 0.12
		Tiempo de carguío (loading time).	24103	Beta	19 * BETA(10.7, 50.7)	0.005563	> 0.14	> 0.08
CARGUIO	EXCAVADORA	Tiempo de acomodo (spot time).	8012	Erlang	ERLA(1.07, 2)	0.003981	> 0.15	> 0.11
		Tiempo de carguío (loading time).	8239	Beta	11 * BETA(12, 24.6)	0.007077	> 0.15	> 0.09
ACARREO	CAMION	Tiempo de cuadre en el frente.	19864	Exponential	EXPO(0.418)	0.004424	> 0.15	> 0.14
		Tiempo de acomodo en el frente.	19867	Beta	19 * BETA(1.26, 20.3)	0.007079	> 0.11	> 0.07
		Tiempo de retroceso en descarga.	19859	Normal	NORM(0.383, 0.224)	0.021096	> 0.15	> 0.12
		Tiempo de descarga (dumping time).	19867	Gamma	GAMM(0.271, 3.16)	0.040932	> 0.15	> 0.15
CHANCADORA	CHANCADORA	Tiempo de retroceso en descarga.	10495	Normal	NORM(0.511, 0.185)	0.062298	> 0.06	> 0.06
		Tiempo de descarga (dumping time).	10494	Gamma	GAMM(0.126, 6.35)	0.055287	> 0.08	> 0.07

Nota: Elaboración propia

Tabla 2

Ajuste de distribuciones de probabilidad para los tiempos de ciclo en época seca

EPOCA SECA								
ACTIVIDAD	**EQUIPOS**	**Tipo de tiempo**	**N° Datos**	**Distribución**	**Expresión**	**Sq. error**	**P-value K-S**	**P-value X^2**
CARGUIO	PALAS	Tiempo de acomodo (spot time).	12436	Erlang	ERLA(0.42, 3)	0.006162	> 0.15	> 0.12
		Tiempo de carguío (loading time).	19764	Beta	12 * BETA(15.6, 65.5)	0.004895	> 0.15	> 0.10
CARGUIO	CARGADORES	Tiempo de acomodo (spot time).	9605	Beta	16 * BETA(3.67, 30.2)	0.002002	> 0.15	> 0.12
		Tiempo de carguío (loading time).	9796	Weibull	WEIB(3.3, 4.45)	0.006504	> 0.14	> 0.09
CARGUIO	EXCAVADORA	Tiempo de acomodo (spot time).	3083	Erlang	ERLA(0.991, 2)	0.003333	> 0.15	> 0.10
		Tiempo de carguío (loading time).	3169	Beta	11 * BETA(12.9, 27.4)	0.004669	> 0.15	> 0.12
ACARREO	CAMION	Tiempo de cuadre en el frente.	32724	Weibull	WEIB(0.463, 1.17)	0.000364	> 0.15	> 0.14
		Tiempo de acomodo en el frente.	32343	Beta	18 * BETA(1.27, 20.6)	0.017689	> 0.14	> 0.08
		Tiempo de retroceso en descarga.	21365	Beta	23 * BETA(0.907, 72.9)	0.003105	> 0.10	> 0.10
		Tiempo de descarga (dumping time).	21373	Erlang	ERLA(0.214, 4)	0.000066	> 0.07	> 0.15
CHANCADORA	CHANCADORA	Tiempo de retroceso en descarga.	11362	Normal	NORM(0.356, 0.243)	0.095586	> 0.08	> 0.15
		Tiempo de descarga (dumping time).	12436	Erlang	ERLA(0.42, 3)	0.006162	> 0.08	> 0.15

Nota: Elaboración propia

4.3 Construcción del modelo a ser simulado en Arena

4.3.1 Identificación de componentes del modelo

Previo al desarrollo y modelado del sistema, es fundamental identificar y estructurar sus componentes clave, los cuales se detallan a continuación:

a) Entidades: Flota de 33 camiones de acarreo (235 t de payload)

b) Recursos:

- Equipos de carguío: 3 Palas, 2 Cargadores Frontales y 1 Excavadora.
- Sistema de chancado:
    - R_BahiasChancadora (Capacidad = 2): Espacios físicos de maniobra y aculatamiento (double spotting).
    - R_Parrilla (Capacidad = 1): Zona física de vaciado de tolva.
    - R_Chancadora (Capacidad = 1): Mecanismo interno de reducción de mineral.

c) Atributos: Propiedades individuales asignadas a cada entidad (camión):

- AT_Tiempo_Inicio_Turno
- AT_Origen y AT_Destino
- AT_Payload (Capacidad/tonelaje efectivo transportado)
- AT_Hora_Mantenimiento y AT_Mantenimiento_Hecho (Control de paradas diarias)

d) Colas (Queues):

- Frentes de minado: Espera de camiones previa al aculatamiento y carguío por parte del equipo asignado.
- Acceso a chancadora: Espera exterior sobre la rampa cuando las 2 bahías de chancado están ocupadas.

- Parrilla de chancado: Espera del camión ya aculatado en la 2da bahía hasta que la chancadora libere el ciclo del mineral previo.

e) Eventos:

- Operativos: Inicio de viaje lleno/vacío, llegada a frente/chancadora, cuadrado/aculatamiento, carguío, vaciado/descarga y retorno.
- No operativos y gestión: Mantenimientos preventivos diarios (30 min), cambios de guardia y paradas programadas de chancadora.

f) Demoras (Delays): Tiempos de espera obligatorios de los camiones en cola ante la falta de disponibilidad de recursos (palas, bahías o chancadora), así como los tiempos operativos fijos de vaciado y paso de mineral.

g) Estados del Sistema: Clasificación del tiempo operacional global para el cálculo de indicadores KPIs:

- Horas Ready (Efectivas/Operativas)
- Horas Delay (Pérdidas operativas)
- Horas Stand-by
- Horas Mantenimiento

4.3.2 Consideraciones para la construcción del modelo

- **Periodo y Capacidad de Validación:**
  - La validación de la lógica del modelo se realiza evaluando 4 días representativos seleccionados aleatoriamente: dos correspondientes a la época húmeda (primer y último quarter) y dos a la época seca (segundo y tercer quarter).
  - El modelo está construido optimizando el uso del número máximo de componentes y bloques (300 SIMAN Objects) permitidos por la versión académica del software.

- **Delimitación de Destinos y Flujos de Minado:**
  - Destinos principales considerados: Chancadora, Depósito de Desmonte (WRF), Depósito de Relaves (TMF) y Stock de Mineral.
  - Exclusión de viajes secundarios: Se omiten los traslados hacia zaranda, lastres secundarios, pebbles y rampas de relleno operativo. Estos representan un volumen marginal (entre 0% y 5% del movimiento diario típico) y no se contemplan en el Plan de Minado Budget objeto de estudio ni en los reportes de movimiento planeado de la unidad minera.

- **Criterios de Disponibilidad y Mantenimiento:**
  - Mantenimiento preventivo: Se incluyen las paradas programadas de mantenimiento diario en los camiones (30 min/día), el mantenimiento preventivo de equipos de carguio.
  - Fallas imprevistas: No se modelan paradas no programadas (breakdowns) en los equipos de carguío (palas, cargadores y excavadora), dado que en la operación real presentan alta confiabilidad y baja frecuencia de falla imprevista.

- **Eventos Operativos Relevantes:**
  - Cambio de Guardia: Se simula de forma explícita el tiempo no operativo por cambio de guardia al inicio del turno, al representar un intervalo de tiempo considerable dentro del ciclo global de la operación.

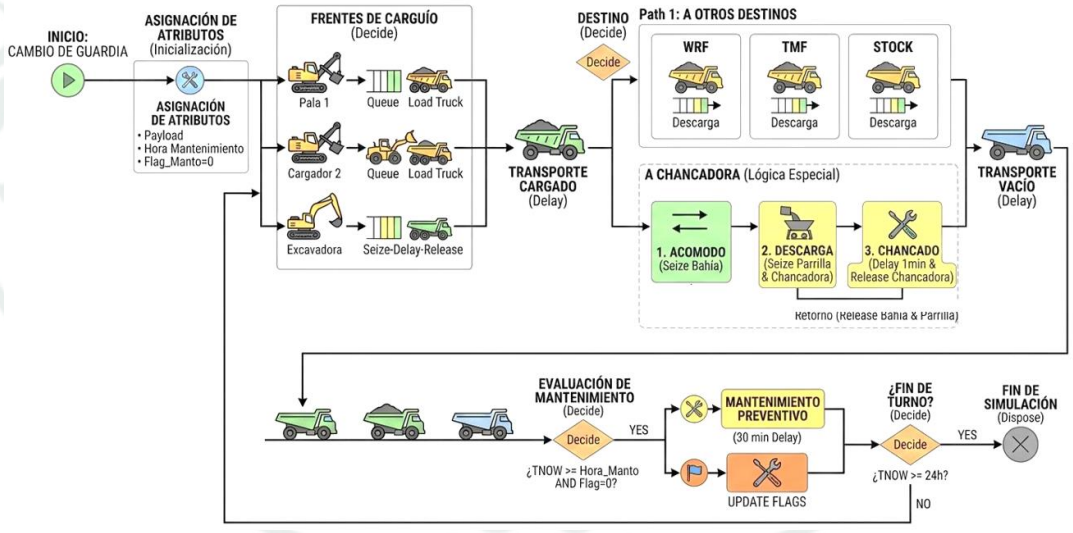
- **Escalabilidad del Modelo:**
    - La arquitectura del modelo es modular, lo que permite su adaptación futura mediante la incorporación de nuevos bloques para evaluar escenarios alternativos e identificar cuellos de botella emergentes en el circuito de transporte.

4.3.3 Diseño y construcción del modelo

a) Antes de detallar cada subsistema en el software Arena, se presenta la estructura general del circuito de carguío y acarreo. El modelo representa un ciclo cerrado de transporte en minería a cielo abierto, abarcando desde el inicio de turno hasta la descarga del mineral o desmonte y el retorno de los camiones a los frentes.

Figura 15

Diagrama de flujo de la lógica operativa del modelo de simulación en Arena

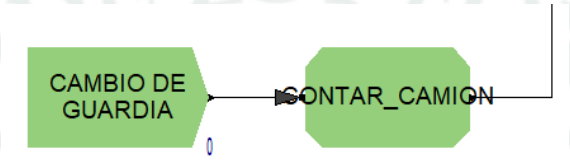


Nota: Elaboración propia

b) El flujo inicia con la incorporación de la flota de camiones al circuito operativo y la definición de los atributos:

Figura 16

Diagrama de flujo de incorporación de camiones y definición de atributos de simulación en Arena

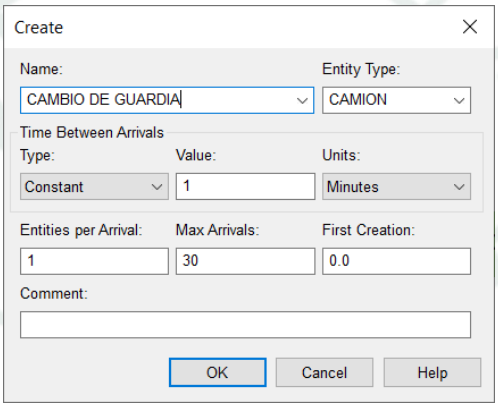


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Create (Cambio de Guardia): Representa el punto de entrada al sistema donde se generan las entidades que corresponden a la flota de transporte al inicio del turno.

Figura 17

Parámetros del Módulo Create usados en el simulador

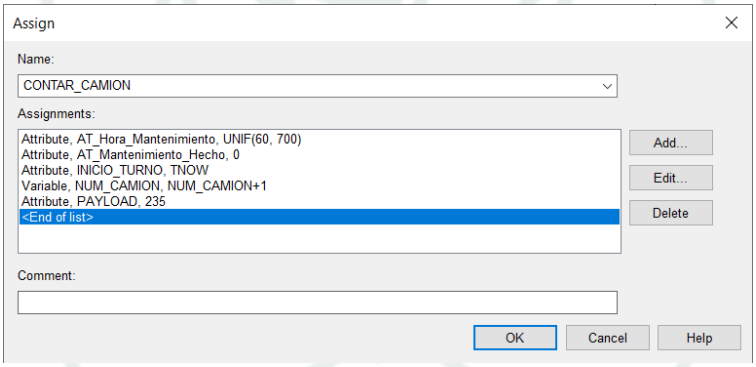


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Assign (Atributos Globales e Individuales): Asigna las propiedades características a cada entidad camión necesarias para la lógica del modelo:
    - AT_Tiempo_Inicio_Turno: Marca temporal del ingreso al circuito.
    - AT_Payload: Tonelaje efectivo (235).
    - AT_Hora_Mantenimiento: Horario programado para la parada preventiva diaria.
    - AT_Asignacion_Frente: Numeral incremental/secuencial para la distribución ordenada de los camiones hacia los frentes de minado.
    -

Figura 18

Parámetros del Módulo Assign usados en el simulador

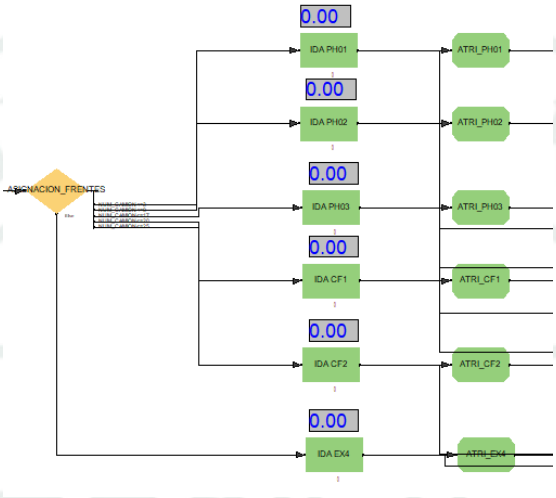


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

c) Una vez parametrizada la entidad, el sistema gestiona el traslado inicial de la flota hacia los frentes asignados e inicia las métricas del ciclo operativo por equipo de carguio:

Figura 19

Diagrama de flujo de asignación de frentes y atributos de simulación en Arena

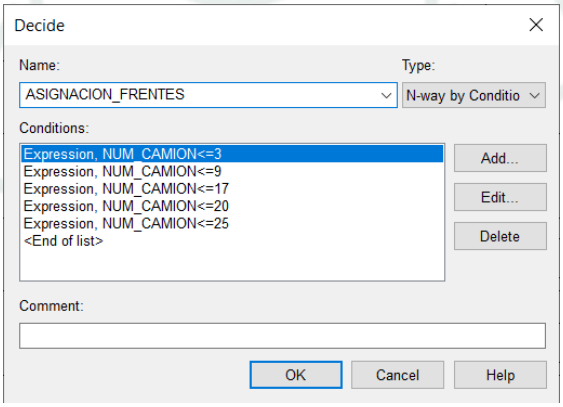


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide (Distribución de Flota): Enruta la flota según el requerimiento real de la mina, asignando entre 8 a 9 camiones por pala y distribuyendo el restante de camiones hacia los cargadores y la excavadora.

Figura 20

Parámetros del Módulo Decide usados en el simulador

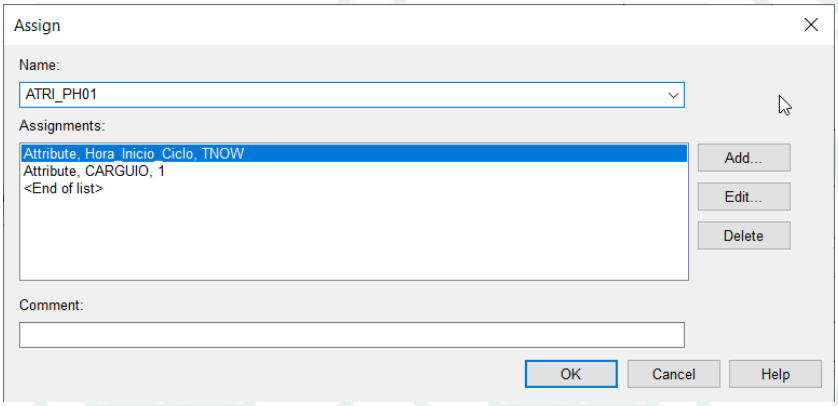


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Delay (Viaje de Posicionamiento Inicial): Simula el tiempo de tránsito desde las bahías del cambio de guardia hasta la cola del frente asignado.
- Módulo Assign (Atributos de Frente y Tiempo): Define el atributo AT_Carguio (identificador del equipo asignado) y captura la marca temporal AT_Inicio_Ciclo para el cálculo de tiempos de ciclo de carguío.

Figura 21

Parámetros en frentes usados en el simulador



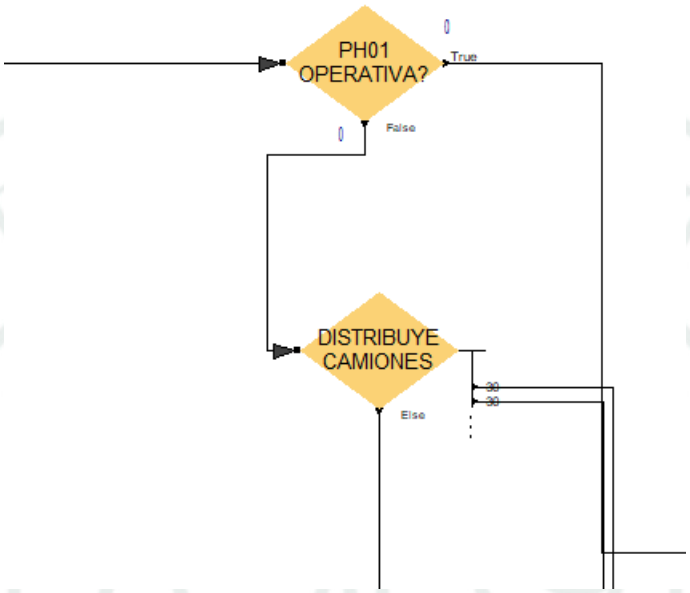
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Cuadro de Variable (Indicador Visual): Módulo en pantalla que contabiliza en tiempo real el número de camiones asignados por frente.

d) Para garantizar la continuidad operativa en escenarios extraordinarios donde un equipo de carguío (pala o cargador) ingrese a un mantenimiento programado de larga duración, el modelo incorpora un subproceso de reasignación en tiempo real:

Figura 22

Diagrama de flujo de asignación de cambio de frentes de simulación en Arena



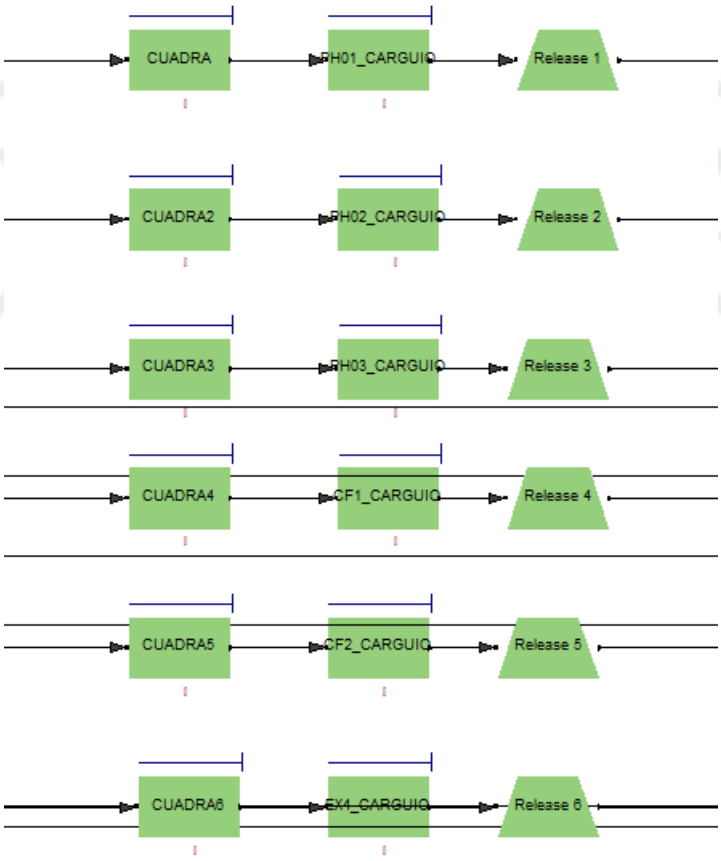
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide (Evaluación Horaria de Manto): Un evaluador condicional valida si la hora actual de simulación (TNOW) coincide con la ventana del mantenimiento mayor asignado al equipo.
- Módulo Decide / Route (Redistribución de Flota): Intercepta la llegada de los camiones asignados a ese frente y los redistribuye proporcionalmente hacia los frentes operativos restantes, evitando acumulaciones de colas ficticias (queuing) en equipos fuera de servicio.

e) Para reflejar las condiciones reales de la operación, donde la amplitud de los frentes permite el aculatamiento por ambos lados del equipo (double spotting), el módulo de carguío se descompone en tres fases secuenciales:

Figura 23

Diagrama de flujo de carguío en frentes de simulación en Arena

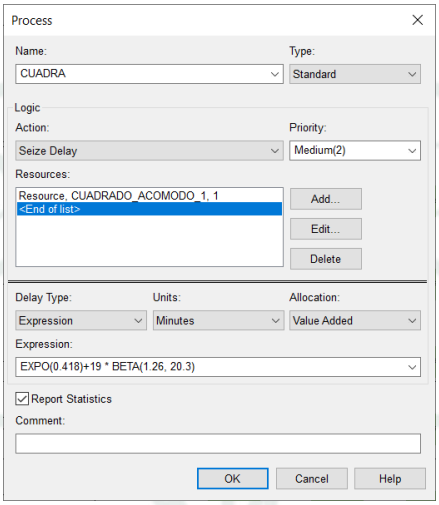


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 1 (Cuadre y Acomodo): Captura el espacio de aculatamiento en el frente. Permite la presencia simultánea de hasta dos camiones en la zona activa de carguío (uno posicionándose mientras el otro carga).

Figura 24

Parámetros del Módulo Process en cuadrado y acomodo en frentes usados en el simulador

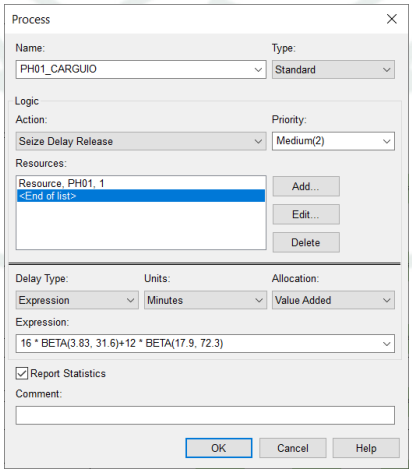


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 2 (Carguío Efectivo): Modela el tiempo de llenado de la tolva por parte del equipo de carguío (pala, cargador o excavadora) asignado mediante el atributo AT_Carguio.

Figura 25

Parámetros del Módulo Process en carguio en frentes usados en el simulador

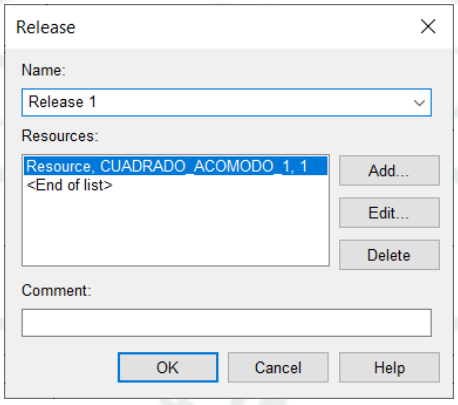


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Release (Liberación del Frente): Libera el espacio físico de posicionamiento para dar paso al siguiente camión en espera.

Figura 26

Parámetros del Módulo Release en carguio en frentes usados en el simulador



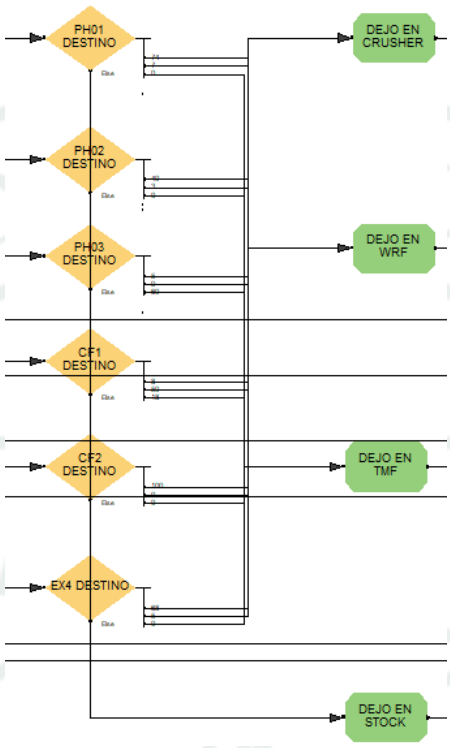
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

Bajo esta lógica, la cola del módulo (Queue) solo registra camiones retenidos a partir de la tercera unidad, ya que los dos primeros se encuentran operando activamente en el frente. Ya que en la unidad minera se tienen frentes anchos y se excluye el carguío por 1 solo lado solo para aperturas de fases y casos excepcionales como minado en zonas de interés por requerimiento especiales.

f) Una vez completado el ciclo de carguío en el frente, el camión inicia su tránsito hacia los puntos de descarga. La distribución de los viajes se realiza mediante la lógica del plan de minado diario:

Figura 27

Diagrama de flujo distribución de rutas en frentes de simulación en Arena



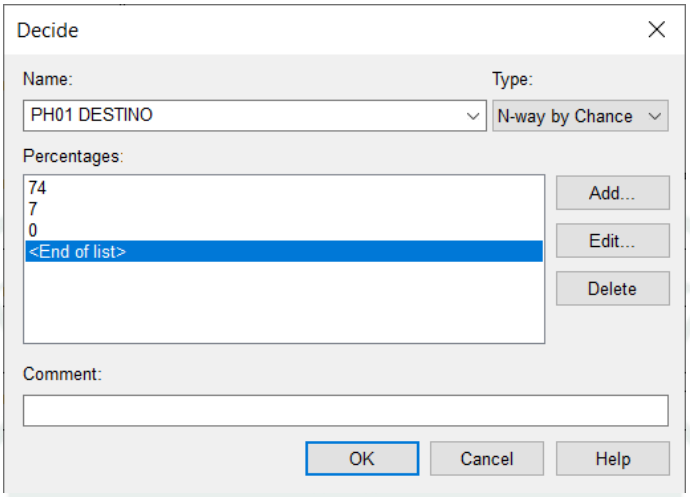
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide (N-Way by Condition): Evalúa la condición específica del frente de origen y divide el flujo de camiones de forma porcentual entre los 4 destinos permitidos: Chancadora, WRF (Waste Rock Facility), TMF (Tailings Management Facility) y Stock.

    - Ejemplo de cálculo: Para un minado proyectado en frente de 60 kt donde se destinen 44 kt a Chancadora y 4 kt a WRF, el módulo programa un 74% de probabilidad de ruteo a Chancadora y un 7% WRF (asignando 0% a TMF y Stock).

Figura 28

Parámetros del Módulo Decide para distribución de rutas usadas en el simulador

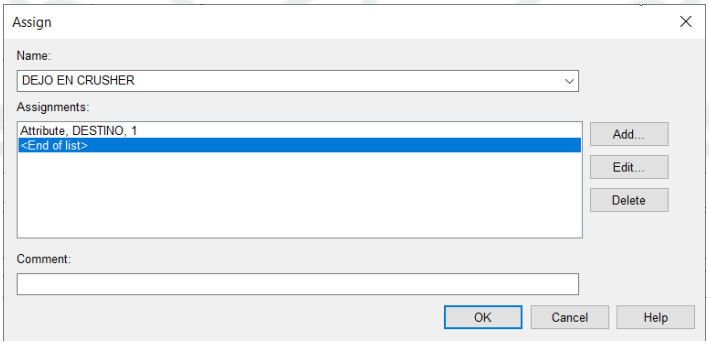


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Assign (Atributo de Destino): Aplica la etiqueta AT_Destino a la entidad camión. Este parámetro permite registrar las métricas de tonelaje transportado por destino y acondiciona las decisiones de control en las siguientes fases del circuito.

Figura 29

Parámetros del Módulo Assign para atributos de rutas usadas en el simulador

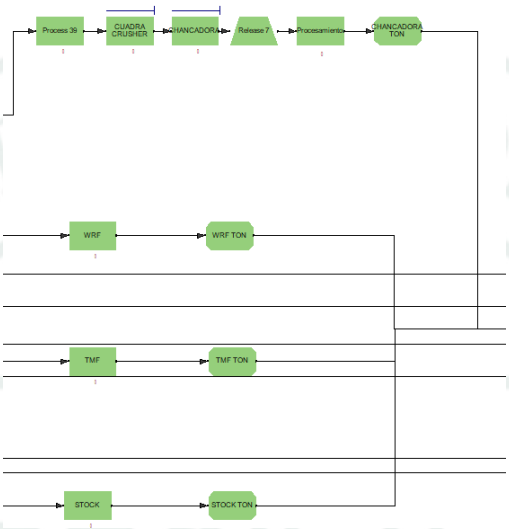


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

h) Consecuentemente el ciclo se divide según el destino asignado en la etapa anterior:

Figura 30

Diagrama de flujo de destinos de simulación en Arena

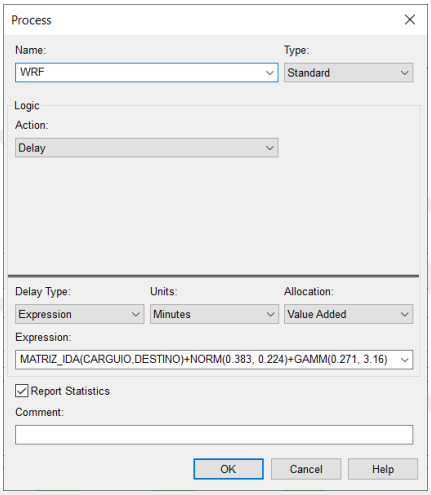


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Ruta Directa (WRF, TMF y Stock):
  - Integrada en un solo Módulo Process para optimizar el límite de bloques SIMAN.
  - Suma tres tiempos en un único proces: Tiempo viajando cargado (extraído mediante matrices de expresión según origen-destino), tiempo de retroceso y tiempo de descarga.

Figura 31

Parámetros del Módulo Process para descargas usadas en el simulador



Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

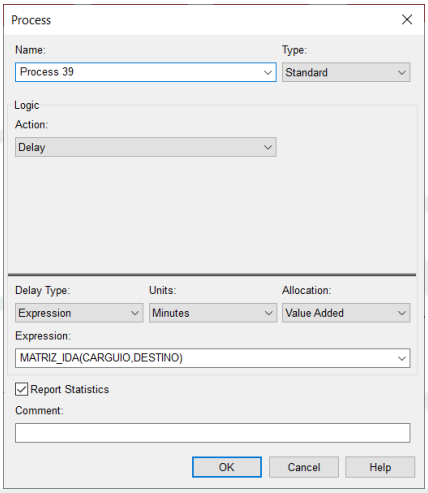
- No considera colas al asumir zonas de descarag amplias y múltiples puntos de descarga disponibles.

- Ruta Especial (Chancadora - Double Spotting):

  - Process 1 (Viaje Cargado): Retardo del trayecto hacia la chancadora.

Figura 32

Parámetros del Módulo Process para tiempo viajando cargado usado en el simulador

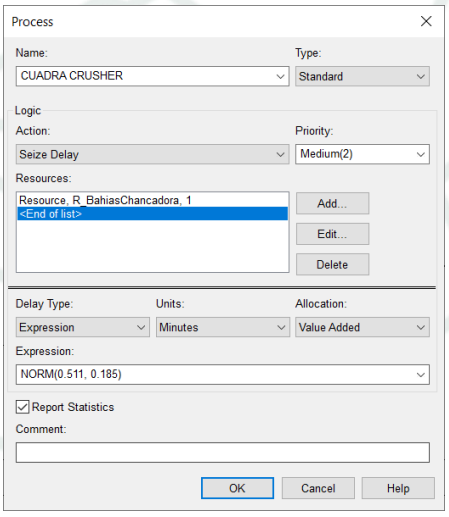


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Aren

- 2 (Cuadre y Acomodo): Captura una de las 2 bahías físicas disponibles (R_BahiasChancadora, Capacidad = 2).

Figura 33

Parámetros del Módulo Process para cuadrado en crusher usado en el simulador

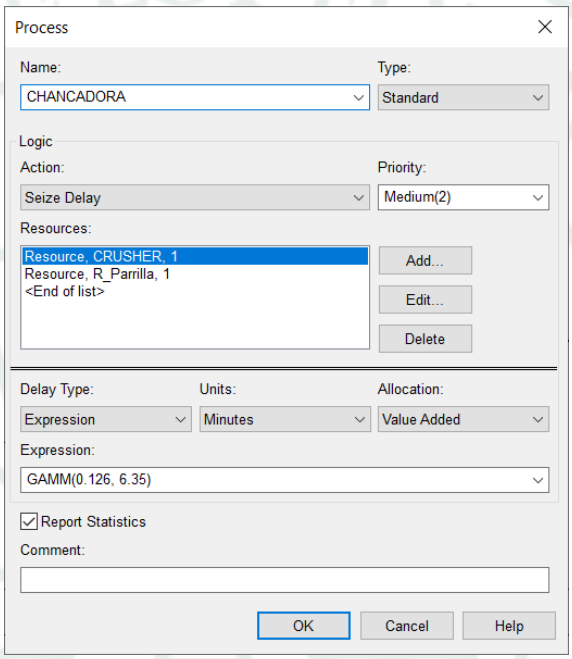


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 3 (Descarga): Captura el recurso único de tolva/parrilla (R_Parrilla, Capacidad = 1) y el chancador (CRUSHER, Capacidad = 1), garantizando que no existan descargas simultáneas.

Figura 34

Parámetros del Módulo Process para descarga en crusher usado en el simulador

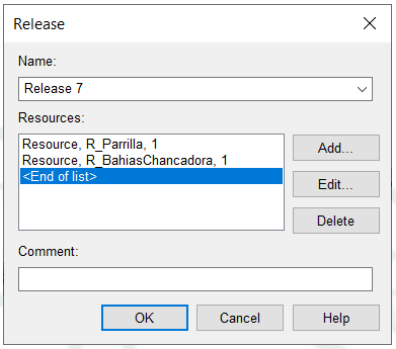


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Release (Liberación del Camión): Libera la bahía y la parrilla, permitiendo que el camión quede libre para retornar inmediatamente sin esperar el proceso de chancado del mineral.

Figura 35

Parámetros del Módulo Release usado en el simulador

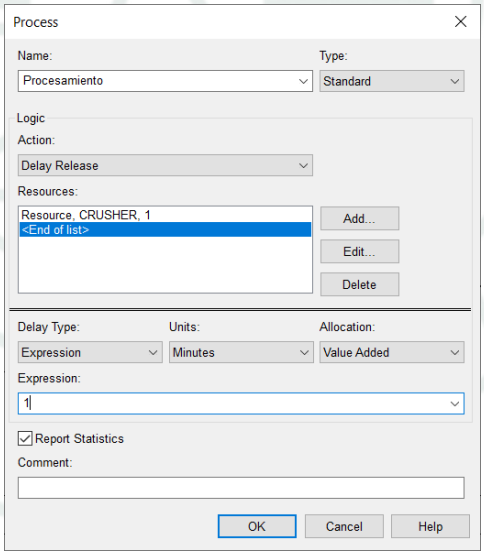


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 4 (Chancado de Mineral): Retardo fijo de 1 minuto que simula el procesamiento del mineral en el chancador, reteniendo únicamente el recurso CRUSHER antes de liberarlo para la siguiente descarga.

Figura 36

Parámetros del Módulo Process de procesamiento del material usado en el simulador

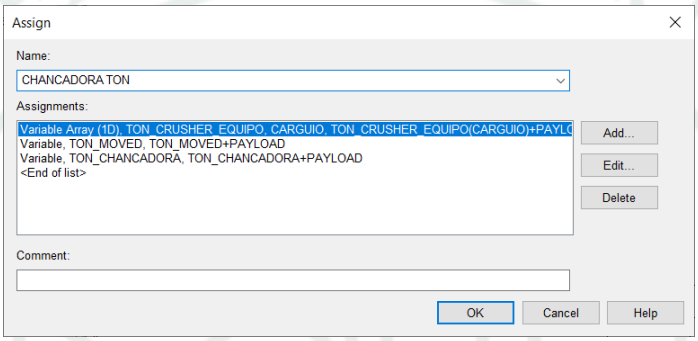


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Assign (Métricas y Contabilidad de Tonelaje):
    - Ubicado al final de los 4 destinos. Acumula el tonelaje movido total, el tonelaje por destino y la matriz cruzada de tonelaje por equipo de carguío y destino (MX_Tonelaje[AT_Carguio, AT_Destino]).

Figura 37

Parámetros del Módulo Assign de atributos en descarga usado en el simulador

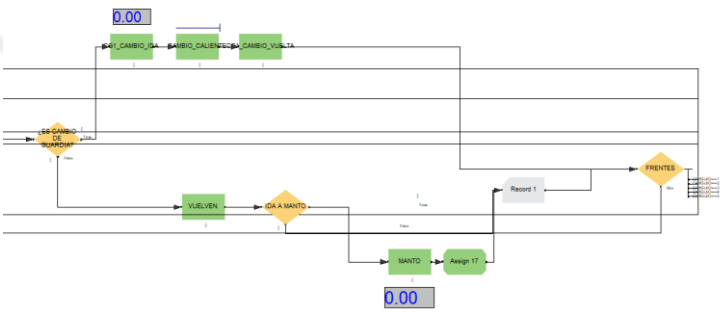


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

i) Posterior al registro de tonelaje, todas las entidades (camiones) convergen en el circuito de retorno para evaluar los eventos del sistema antes de iniciar un nuevo ciclo:

Figura 38

Diagrama de flujo de cambio de guardia y mantenimiento usados en la simulación en Arena

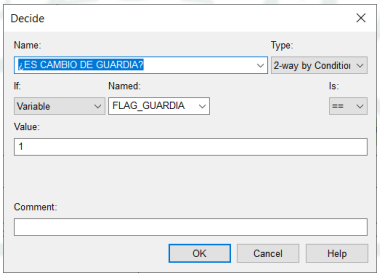


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide 1 (Evaluación de Cambio de Guardia): Consulta la variable lógica impulsada por un temporizador externo (FLAG_GUARDIA = 1 al transcurrir cada 12 horas).

Figura 39

Parámetros del Módulo Decide para cambio de guardia usado en el simulador

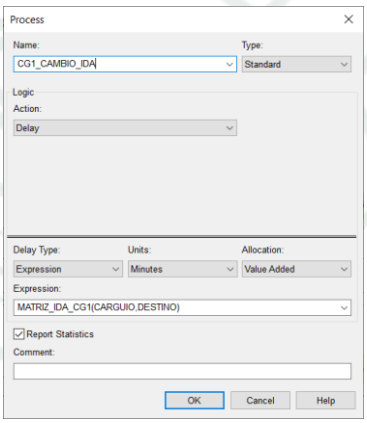


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

  - Ruta de Cambio de Guardia (Subproceso de 3 Módulos):
    - Process 1 (Viaje a Bahías): Retardo de retorno desde la zona de descarga hacia el área de bahías (matriz de expresión).

Figura 40

Parámetros del Módulo Process para cambio de guardia usado en el simulador

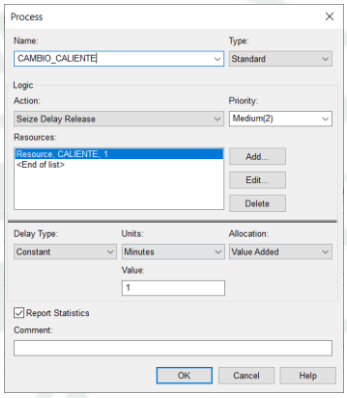


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 2 (Cambio de Guardia Efectivo): Parada programada de 1 minuto que simula la transición de operadores.

Figura 41

Parámetros del Módulo Process para cambio en caliente usado en el simulador

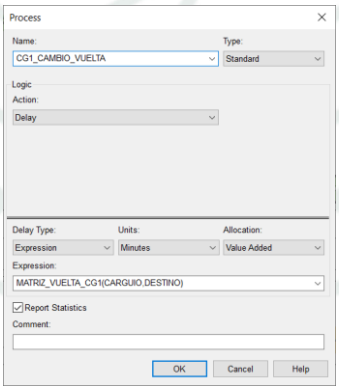


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Process 3 (Viaje de Retorno a Frente): Retardo de desplazamiento desde las bahías hacia los frentes de minado (matriz de expresión).

Figura 42

Parámetros del Módulo Process para retorno al frente usado en el simulador



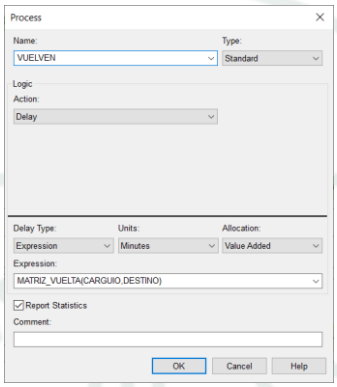
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Ruta Normal (Retorno Directo Vacío):

- Process (Viaje Vacío): Retardo por tiempo viajando vacio al fondo de mina mediante matriz de tiempos.

Figura 43

Parámetros del Módulo Process para retorno al frente por destino usado en el simulador

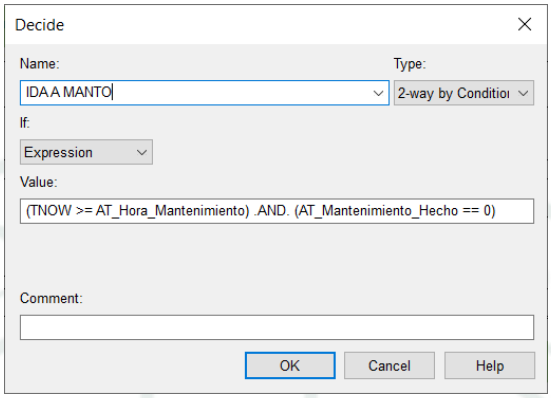


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide 2 (Evaluación de Mantenimiento Preventivo): Valida si la hora actual de simulación (TNOW) alcanza el horario programado en AT_Hora_Mantenimiento. De cumplirse, el camión ingresa a un Módulo Process de 30 minutos de parada preventiva. Al ser individual y escalonado durante la jornada, evita la detención simultánea de la flota.

Figura 44

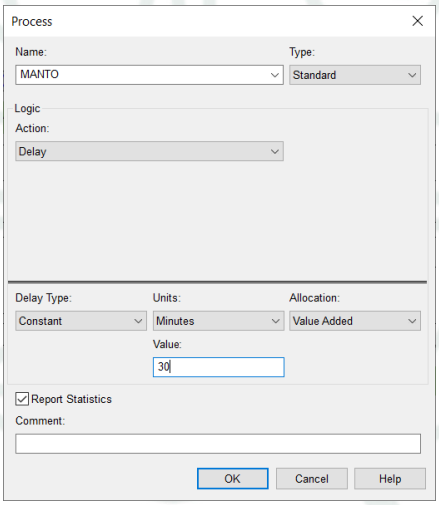
Parámetros del Módulo Decide para mantenimiento usado en el simulador



Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

Figura 45

Parámetros del Módulo Process para mantenimiento usado en el simulador

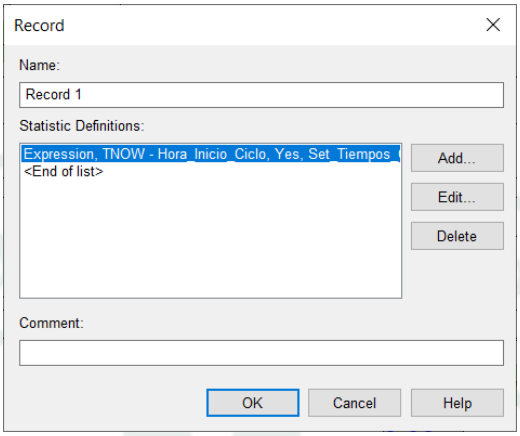


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Record (Métricas de Desempeño): Registra el tiempo total del ciclo de transporte (Cycle Time) para el análisis estadístico posterior.

Figura 46

Parámetros del Módulo Record usado en el simulador

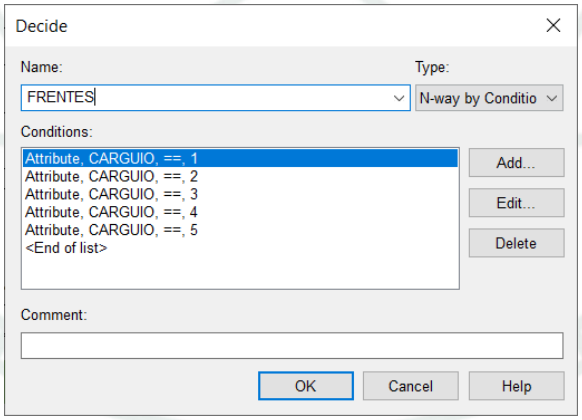


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Módulo Decide 3 (Reasignación de Frentes): Lee el atributo AT_Carguio fijado al inicio del ciclo y enruta nuevamente al camión hacia la cola de la pala, cargador o excavadora correspondiente para iniciar el siguiente viaje.

Figura 47

Parámetros del Módulo decide para distribución de camiones usado en el simulador



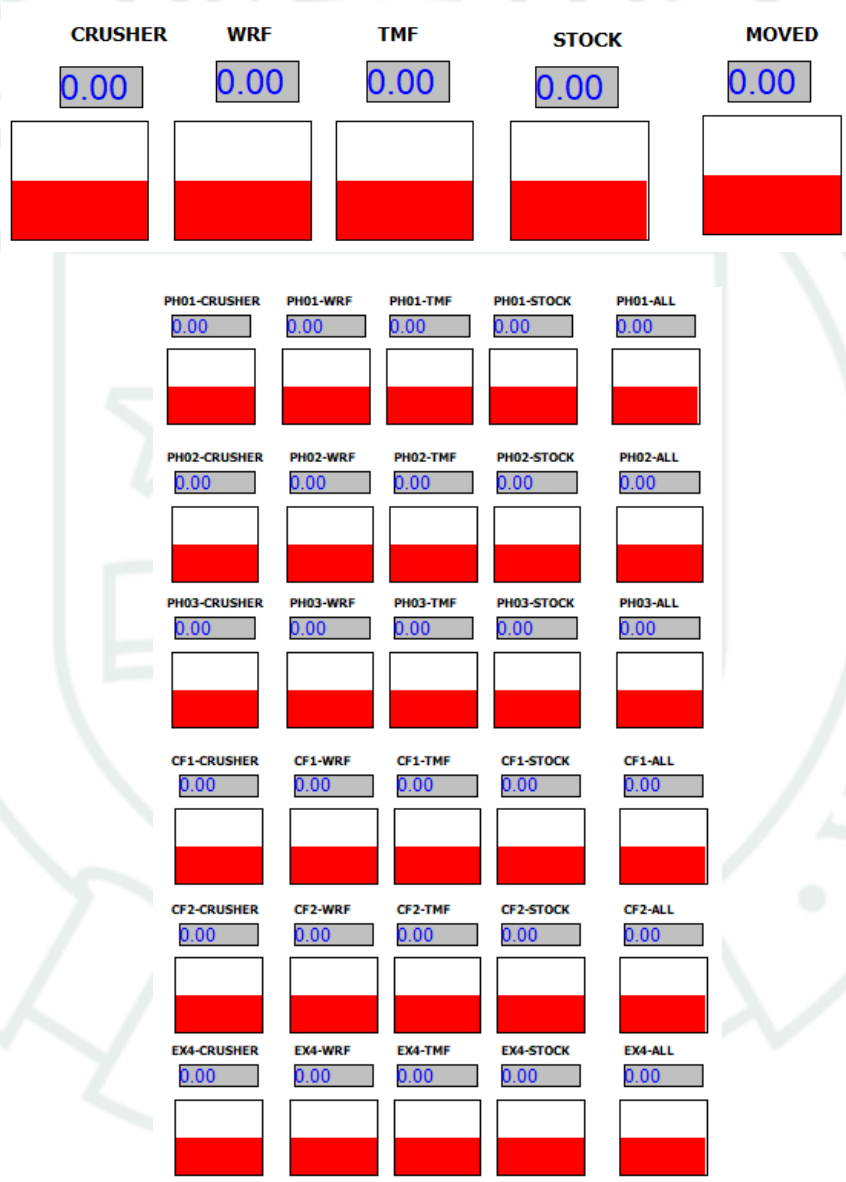
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

Durante las fases iniciales de verificación y validación del modelo (ejecución de réplica única), se integraron dashboards de salida gráfica directamente en el entorno visual de Arena:

- Gráficos de Producción (Histogramas/Plot Charts): Monitoreo en tiempo real del tonelaje acumulado por destino (WRF, TMF, Stock, Chancadora) y por equipo de carguío.

Figura 48

Medidores de tonelaje por destino y por equipo usado en el simulador

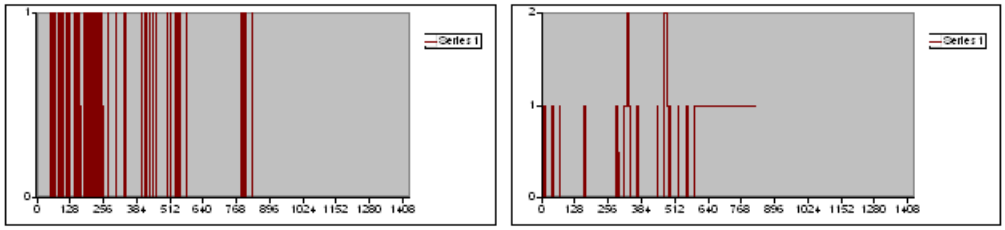


Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Gráficos de Tiempos y Ciclos: Curvas continuas de variación de tiempos de ciclo y tiempos de espera en cola (queue time).

Figura 49

Graficas de seguimiento usado en el simulador



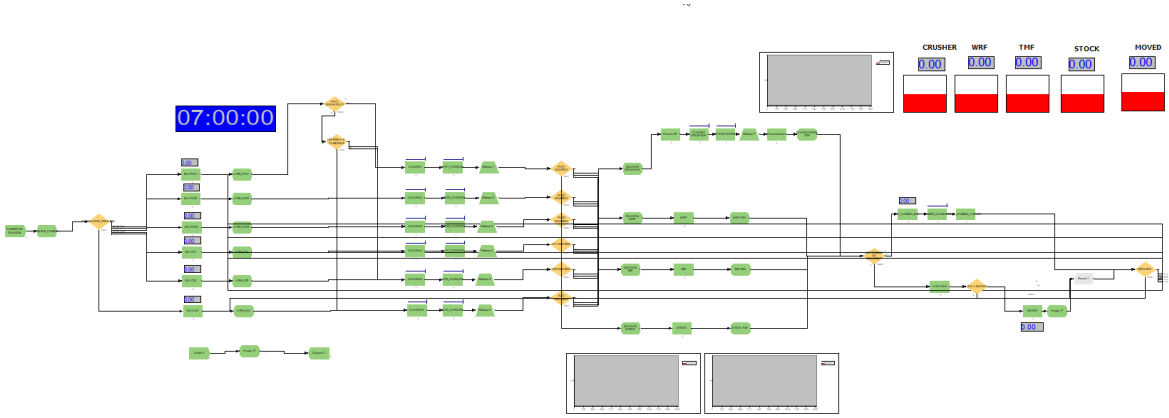
Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

- Propósito en la Tesis: Estas gráficas se emplean exclusivamente para auditar la coherencia lógica y la estabilidad del sistema en el escenario base. Para la fase de experimentación formal y toma de decisiones (múltiples réplicas con intervalos de confianza del 95%), el análisis se realiza mediante las carpetas de salida (Category Overview Reports) exportadas por Arena.Medición de resultados

A continuación, se presenta la arquitectura completa del modelo que articula desde la inicialización de flota hasta la recirculación y control de métricas:

Figura 50

Arquitectura general del simulador



Nota: Extraído del modelo hecho en el software Arena

4.4 Verificación y validación

4.4.1 Verificación

Una vez completada la construcción y programación de los módulos en el entorno de simulación Arena, se procedió a la ejecución de la primera corrida con representación animada a fin de comprobar la consistencia lógica del sistema. El proceso de verificación tiene como objetivo comprobar que la interacción conceptual y el flujo de las entidades guarden una correspondencia lógica y adecuada con la dinámica operativa real del circuito de minado.

Durante la animación, se constató que las entidades (camiones) transitan de manera secuencial y correcta a través del mapa de módulos programado, respetando los tiempos de ciclo y retardos programados:

- Fase de Carguío: La entidad ingresa al frente de minado, ejecuta el tiempo de posicionamiento/cuadre y prosigue con la etapa de carguío efectivo por parte del equipo asignado (pala, cargador o excavadora).

- Transporte y Descarga: Finalizado el llenado de la tolva, el camión realiza el acarreo en rampa hacia su punto de descarga final (Chancadora, WRF, TMF o Stock), ejecutando la lógica de maniobra y descarga según el destino (respetando el aculatamiento por doble bahía y restricción de parrilla única en chancadora).
- Retorno y Eventos Operativos: Registrado el tonelaje, el camión inicia el transporte en rampa de retorno en condición de vacío hacia el fondo de mina. Durante este trayecto, el sistema evalúa e intercepta correctamente las unidades que requieren ingreso a mantenimiento preventivo (30 min) o la transición por cambio de guardia (cada 12 h).

Dado que el comportamiento visual y la secuencia de estados de la flota coinciden de forma exacta con las reglas del proceso, los tiempos operativos y tonelajes movidos del yacimiento, se concluye que el modelo de simulación se encuentra verificado dinámicamente y cumple con la lógica del sistema real.

4.4.2 Validación Independiente del Modelo

La validación del modelo de simulación de eventos discretos se llevó a cabo mediante una evaluación de capacidad predictiva fuera de muestra. Este procedimiento consistió en comparar el promedio de las 100 réplicas independientes de simulación al 95% de nivel de confianza frente a los registros históricos reales de los 4 días operativos aislados que no fueron utilizados en la etapa de ajuste de distribuciones en el Input Analyzer. Los KPIs evaluados para la validación cuantitativa fueron:

- **Tonelaje Total Movido y Distribución por Destino:** Tonelaje movido descargado en Chancadora, Botadero (WRF), Relavera (TMF) y Stock.
- **Tonelaje Movido por Equipo de Carguío:** Tonelaje movido por cada una de las palas, cargadores y excavadora.

- **Productividad Efectiva (t/hr):** Tonelaje movido por hora obtenido por equipo en frente de minado.

A continuación, en las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados comparativos de validación para los días representativos de época húmeda y época seca, incluyendo el medio ancho del intervalo de confianza (Half Width) obtenido tras las 100 réplicas:

Tabla 3

Validación para época húmeda

VALIDACION PARA EPOCA HUMEDA									
Items		**Dia estudiado 4-Enero-2026**				**Dia estudiado 6-Febrero-2026**			
Clasificación	**Medidores**	**Real**	**Average Simulado**	**Half Width Simulado**	**Real /Simulado**	**Real**	**Average Simulado**	**Half Width Simulado**	**R Real /Simulado**
DESTINO	**Total**	270,928	269,362	366.03	**100.6%**	226,482	225,619	468.89	**100.4%**
	Chancadora	103,597	101,353	314.21	**102.2%**	106,838	104,788	567.82	**102.0%**
	WRF	110,235	109,652	433.98	**100.5%**	20,200	20,292	429.99	**99.5%**
	TMF	29,441	30,168	434.11	**97.6%**	36,764	36,467	280.98	**100.8%**
	STOCK	27,656	28,189	283.50	**98.1%**	62,679	64,072	596.77	**97.8%**
EQUIPO	**PH01**	42,413	42,771	454.99	**99.2%**	21,088	21051	234.62	**100.2%**
	PH02	61,425	59,836	157.11	**102.7%**	54,395	55401	94.28	**98.2%**
	PH03	69,174	68,221	460.64	**101.4%**	55,056	54534	148.17	**101.0%**
	CF1	28,684	30,115	111.12	**95.2%**	21,140	20608	148.98	**102.6%**
	CF2	38,466	38,809	392.85	**99.1%**	44,488	42435	118.54	**104.8%**
	EX4	30,766	29,611	183.52	**103.9%**	30,315	31589	139.84	**96.0%**
Productividad t/hr	**PH01**	3691.1	3722.2		**99.2%**	2433.8	2429.5		**100.2%**
	PH02	3049.9	2971.0		**102.7%**	2690.0	2739.7		**98.2%**
	PH03	3264.1	3219.1		**101.4%**	2741.3	2715.3		**101.0%**
	CF1	1483.4	1557.4		**95.2%**	1355.0	1320.9		**102.6%**
	CF2	2417.5	2439.0		**99.1%**	2047.7	1953.2		**104.8%**
	EX4	1688.9	1625.4		**103.9%**	1754.0	1827.7		**96.0%**

Nota: Elaboración propia

Tabla 4

Validación para época Seca

VALIDACION PARA EPOCA SECA									
Items		**Dia estudiado 25-Mayo-2026**				**Dia estudiado 23-Junio-2026**			
Clasificación	**Medidores**	**Real**	**Average Simulado**	**Half Width Simulado**	**Real /Simulado**	**Real**	**Average Simulado**	**Half Width Simulado**	**R Real /Simulado**
DESTINO	**Total**	241,161	243,084	123.37	**99.2%**	219,137	219,883	253.90	**99.7%**
	Chancadora	96,770	95,633	103.15	**101.2%**				
	WRF	78,043	79,925	208.98	**97.6%**	115,503	114,640	253.25	**100.8%**
	TMF	37,045	37,461	86.08	**98.9%**	57,526	58,073	301.08	**99.1%**
	STOCK	29,303	30,066	95.25	**97.5%**	46,108	47,171	207.38	**97.7%**
EQUIPO	**PH01**	83,281	85,707	441.98	**97.2%**	63,884	62,172	231.80	**102.8%**
	PH02	52,649	50,441	198.72	**104.4%**	74,515	75,385	359.80	**98.8%**
	PH03	69,365	70,421	175.80	**98.5%**				
	CF1					5,679	5,436	376.64	**104.5%**
	CF2	35,867	36,515	57.14	**98.2%**	33,603	34,181	282.98	**98.3%**
	EX4					41,455	42,711	40.55	**97.1%**
Productividad t/hr	**PH01**	3866.9	3979.5		**97.2%**	2915.0	2836.9		**102.8%**
	PH02	2763.0	2647.1		**104.4%**	3361.0	3400.2		**98.8%**
	PH03	3248.2	3297.6		**98.5%**				
	CF1					2307.9	2208.8		**104.5%**
	CF2	1776.4	1808.5		**98.2%**	1818.4	1849.7		**98.3%**
	EX4					1912.0	1969.9		**97.1%**

Nota: Elaboración propia

Como se observa en las Tablas 3 y 4, la desviación relativa entre los valores reales de los días de prueba independientes y los promedios obtenidos por la simulación no superó en ningún caso el margen del 5%, registrando un Half Width reducido gracias al número de 100 réplicas ejecutadas. La comparación del modelo frente a los cuatro días independientes demostró una correspondencia satisfactoria con los registros históricos de campo, manteniéndose dentro del criterio de error relativo establecido . Por tanto, el simulador constituye una aproximación adecuada para la evaluación de escenarios de minado bajo las condiciones operativas evaluadas, sin asumir una validez predictiva general ante escenarios no parametrizados.

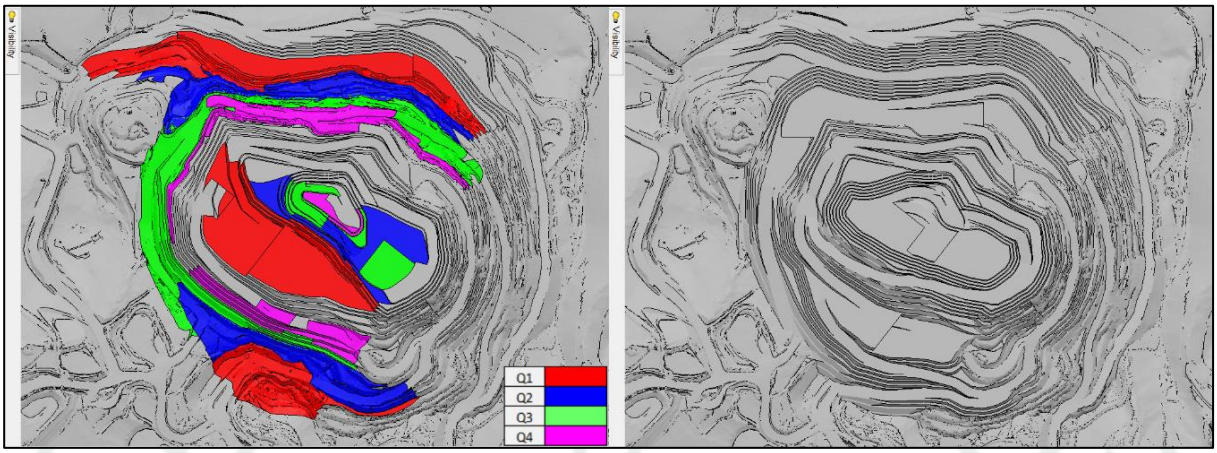
4.5 Simulación de escenarios futuros

Una vez validado cuantitativamente el modelo de simulación de eventos discretos, se procede a ejecutar el análisis prospectivo por trimestres (Quarters) para el periodo 2027, discriminando operativamente entre época seca y época húmeda. Para la estructuración de las corridas del modelo en el software Arena, se definieron los siguientes criterios técnicos y restricciones del sistema:

- Restricciones Rígidas de Destino: Alimentación obligatoria y prioritaria de 90kt a Chancadora y 40kt a la relavera (TMF).
- Destinos Variables: El volumen restante y excedente extraído en los frentes se deriva hacia los botaderos de desmonte (WRF) o a los stocks, según la naturaleza del material.
- Tiempos Fijos Operativos: Se mantuvieron los parámetros históricos usados en la etapa de validación.
- Tiempos Variables de Transporte: Fueron recalculados y actualizados en el modelo en función del perfil de transporte proyectado (distancias, rampas y pendientes) derivado de los avances topográficos esperados para cada componente de la mina en el 2027.

Figura 51

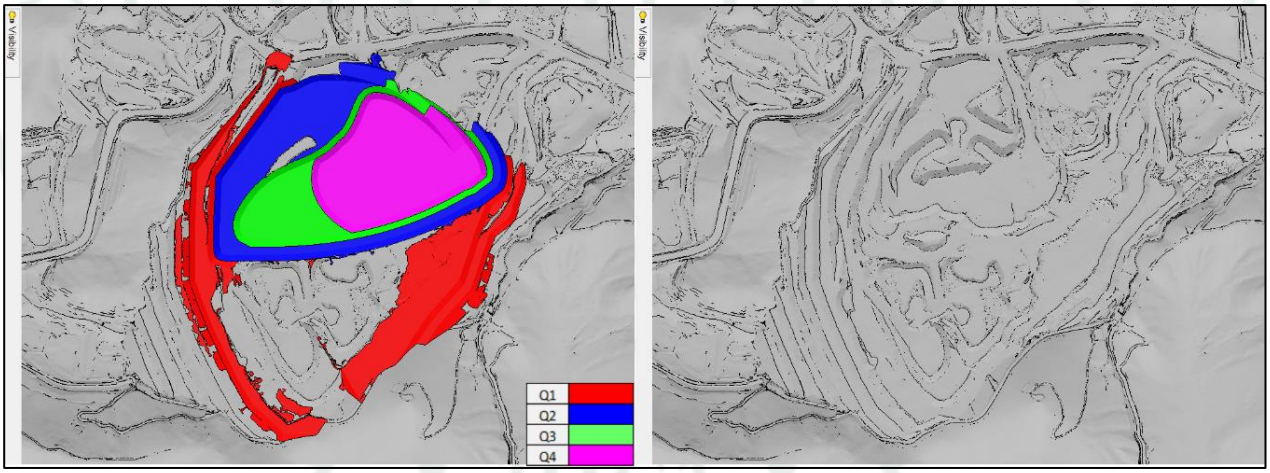
Quarters de minado para el 2027 en tajo



Nota: Elaboración propia extraído de mineplan

Figura 52

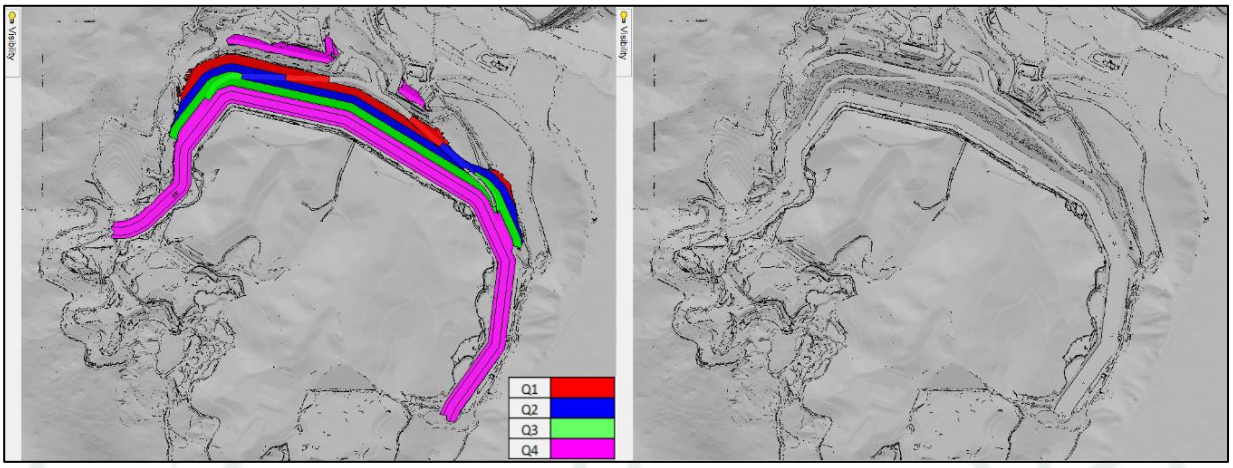
Quarters de descarga WRF para el 2027



Nota: Elaboración propia extraído de mineplan

Figura 53

Quarters de descarga TMF para el 2027



Nota: Elaboración propia extraído de mineplan

4.5.1 Productividades Simuladas vs. Productividades de Planificación

En la siguiente tabla se consolidan las productividades teóricas asignadas por el área de planeamiento frente a las productividades reales sinceradas mediante el simulador en Arena. Adicionalmente, se incluye una productividad práctica (redondeada), la cual se adopta por criterio técnico para facilitar los cálculos operativos

Tabla 5

Resultados simulados y datos para análisis vs plan– Época húmeda

EPOCA HUMEDA (Q1 y Q4)			
Equipos	**Productividad simulada**		**Productividad planeada**
	Resultado simulación	**Resultado para análisis**	
PH01	3123	3100	2950
PH02	3142	3100	2950
PH03	3109	3100	2950
CF1	1883	1900	1900
CF2	2039	2000	1900
EX4	1458	1450	1000

Nota: Elaboración propia

Tabla 6

Resultados simulados y datos para análisis vs plan– Época seca

EPOCA SECA (Q2 y Q3)			
Equipos	**Productividad simulada**		**Productividad planeada**
	Resultado simulación	**Resultado para análisis**	
PH01	3389	3300	3200
PH02	3289	3300	3200
PH03	3374	3300	3200
CF1	1927	2000	2000
CF2	2088	2000	2000
EX4	1539	1500	1000

Nota: Elaboración propia

4.6 Análisis de resultados

El análisis principal toma como base los parámetros operativos del plan oficial: el porcentaje de utilización de cada equipo, la productividad programada, las horas ready acumuladas y la producción resultante por trimestres (Quarters). Para la evaluación comparativa, se mantuvieron constantes las horas de operación y la utilización, sustituyendo únicamente la productividad teórica por la productividad práctica sincerada mediante la simulación discreta.

Como resultado de este ajuste, la capacidad potencial simulada del sistema pasa de 87.5 Mt a 92.8 Mt, representando un incremento de +5.3 Mt en el tonelaje movido. Cabe precisar que esta cifra constituye un techo operativo probabilístico bajo los supuestos adoptados y no un logro automáticamente alcanzable. A continuación, se presentan las tablas comparativas entre el plan base y el escenario sincerado:

Tabla 7

Plan actual 2027 de tonelajes movidos por equipo y quarters

EQUIPO	ESTADOS	Q1	Q2	Q3	Q4
PH01	Utilización	73%	65%	80%	78%
	Productividad	2950	3200	3200	2950
	HR ready	1583	1418	1774	1719
	Producción	4,670,651	4,536,283	5,677,268	5,069,835
PH02	Utilización	74%	72%	75%	73%
	Productividad	2950	3200	3200	2950
	HR ready	1600	1571	1665	1612
	Producción	4,720,255	5,026,584	5,328,366	4,753,967
PH03	Utilización	72%	77%	75%	73%
	Productividad	2950	3200	3200	2950
	HR ready	1544	1676	1653	1613
	Producción	4,556,220	5,364,708	5,288,773	4,757,846
CF1	Utilización	62%	65%	57%	49%
	Productividad	1900	2000	2000	1900
	HR ready	1340	1409	1249	1076
	Producción	2,545,145	2,817,450	2,498,400	2,044,871
CF2	Utilización	74%	77%	68%	75%
	Productividad	1900	2000	2000	1900
	HR ready	1608	1676	1507	1654
	Producción	3,055,580	3,351,040	3,013,120	3,142,144
EX4	Utilización	64%	65%	65%	49%
	Productividad	1000	1000	1000	1000
	HR ready	1375	1409	1446	1087
	Producción	1,374,590	1,408,875	1,446,000	1,086,920
TOTAL MOVIDO		**20,922,441**	**22,504,940**	**23,251,927**	**20,855,582**
			87,534,890		
SR		0.90	0.97	1.33	0.88
ORE			**43,498,401**		
WASTE			**44,036,489**		

Nota: Elaboración propia

Tabla 8

Plan actual 2027 de tonelajes movidos simulados por equipo y quarters

EQUIPO	ESTADOS	Q1	Q2	Q3	Q4
PH01	Utilización	73%	65%	80%	78%
	Productividad	3100	3300	3300	3100
	HR ready	1583	1418	1774	1719
	Producción	4,908,141	4,678,042	5,854,683	5,327,623
PH02	Utilización	74%	72%	75%	73%
	Productividad	3100	3300	3300	3100
	HR ready	1600	1571	1665	1612
	Producción	4,960,268	5,183,664	5,494,877	4,995,694
PH03	Utilización	72%	77%	75%	73%
	Productividad	3100	3300	3300	3100
	HR ready	1544	1676	1653	1613
	Producción	4,787,893	5,532,355	5,454,047	4,999,770
CF1	Utilización	62%	65%	57%	49%
	Productividad	1900	2000	2000	1900
	HR ready	1340	1409	1249	1076
	Producción	2,545,145	2,817,450	2,498,400	2,044,871
CF2	Utilización	74%	77%	68%	75%
	Productividad	2000	2000	2000	2000
	HR ready	1608	1676	1507	1654
	Producción	3,216,400	3,351,040	3,013,120	3,307,520
EX4	Utilización	64%	65%	65%	49%
	Productividad	1450	1500	1500	1450
	HR ready	1375	1409	1446	1087
	Producción	1,993,156	2,113,313	2,169,000	1,576,034
TOTAL MOVIDO		**22,411,002**	**23,675,864**	**24,484,127**	**22,251,512**
			92,822,506		
SR		0.90	0.97	1.33	0.88
ORE			**46,147,302**		
WASTE			**46,675,203**		

Nota: Elaboración propia

Al discriminar el tonelaje adicional simulado según la relación de desbroce (Strip Ratio), se identifica un excedente de 2.6 Mt de mineral y 2.6 Mt de desmonte. Dado que la capacidad de recepción de la chancadora es rígida (90 kt/día), las 2.6 Mt excedentes de mineral no pueden procesarse directamente y deben derivarse a Stock LG, lo que implicaría un costo computable de remanejo de $ 3,178,681.2 ($1.20 US$/t). Asimismo, las 2.6 Mt adicionales de desmonte demandan capacidad receptora y velocidad de habilitación en el botadero (WRF) y la presa de relaves (TMF). La integración de estas restricciones confirma que las 92.8 Mt representan una capacidad potencial simulada cuya factibilidad práctica depende de absorber dicho remanejo y garantizar la liberación oportuna de botaderos.

Costo de Remanejo = 2,648,901 X 1.20 = $ 3,178,681.2

Tabla 9

Comparativa entre plan y simulación

Clasificación	Plan	Simulado	Delta
ORE	43,498,401	46,147,302	2,648,901
WASTE	44,036,489	46,675,203	2,638,714
TOTAL	**87,534,890**	**92,822,506**	**5,287,616**

Nota: Elaboración propia

4.7 Valor Estratégico y alcance del Plan Sincerado

La importancia del sinceramiento de la productividad mediante simulación discreta trasciende la simple evaluación del costo de remanejo extra ($3,178,681.2), consolidándose como un pilar de secuenciamiento y creación de valor en todos los horizontes de la organización:

- **Corto Plazo (Operativo):** Brinda visibilidad sobre la variabilidad mensual del sistema, apoyando la identificación oportuna de potenciales congestiones en accesos y puntos de descarga.
- **Mediano Plazo (Táctico):** Aporta información técnica para la toma de decisiones. En lugar de asumir el envío automático de 2.6 Mt de mineral excedente a stock, permite evaluar la redistribución de equipos hacia el avance de nuevos frentes o el desbroce según la estrategia de la mina.
- **Largo Plazo y Nivel Corporativo (Estratégico):** Ayuda a acortar la brecha entre el plan táctico y el modelo Life of Mine (LOM). El uso de escenarios probabilísticos reduce la variabilidad en las proyecciones de extracción, ofreciendo un soporte analítico más sólido para fundamentar las decisiones de planificación y asignación de capital (CAPEX).

CONCLUSIONES

1. Sinceramiento de la Productividad: Se desarrolló y validó un modelo de simulación de eventos discretos (SED) en Arena que incorporó distribuciones estocásticas en lugar de promedios determinísticos estáticos, permitiendo aproximar la capacidad potencial del sistema de carguío y acarreo y reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros para el planeamiento de mediano plazo.
2. Identificación de Desviaciones: Los datos tradicionales subestimaban el rendimiento real. La simulación demostró que la productividad sincerada para palas (3,100 t/h en época húmeda y 3,300 t/h en seca) supera los valores teóricos asumidos (2,950 t/h y 3,200 t/h, respectivamente).
3. Ajuste de Variables Estocásticas: Se demostró mediante Input Analyzer que los tiempos de ciclo no son constantes. Las variables críticas se ajustaron a distribuciones Beta, Erlang, Gamma, Weibull y Normal, validadas por pruebas de square error.
4. Validación del Simulador: El modelo en Arena presentó una correspondencia satisfactoria frente a los cuatro días independientes evaluados, registrando un error relativo menor al 5% en tonelaje y productividad, lo que confirma su aptitud para estimar el desempeño del sistema bajo las condiciones estudiadas.
5. Impacto en el Plan 2027: La simulación discreta del Plan 2027 identificó una capacidad potencial simulada de 92.8 Mt frente a las 87.5 Mt del plan base (+5.3 Mt). Se enfatiza que esta cifra constituye un techo operativo estocástico y no un resultado garantizado, ya que su aprovechamiento en la práctica requiere gestionar el remanejo de 2.6 Mt de mineral en stock ($3,178,681.20) y contar con la capacidad de recepción y habilitación física para 2.6 Mt de desmonte adicional en los botaderos (WRF y TMF)

RECOMENDACIONES

- Institucionalizar la Herramienta: Adoptar el simulador en Arena dentro del área de Planeamiento de Mediano Plazo como estándar para la elaboración de planes Budget y trimestrales en lugar de usar rendimientos estáticos.
- Actualización de Datos: Actualizar semestralmente las distribuciones de probabilidad de los tiempos de ciclo y velocidades según la variación topográfica de los tajos y distancias equivalentes (EFH).
- Optimización de Asignación: Utilizar el simulador para ajustar la relación pala-camión y mitigar colas en chancadora y botaderos a medida que la flota alcance su máxima capacidad.
- Escalabilidad Tecnológica: Migrar el modelo a una licencia comercial de Arena o a librerías de código abierto para superar el límite de 300 entidades e integrar fallas no programadas y más rutas de acarreo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bazalar, J. (2023). Propuesta de un modelo de simulación de líneas de espera para optimizar el tiempo y el número de camiones de transporte de material y palas de la mina de Fosfato Bayovar a la planta concentradora [Tesis de licenciatura, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional UPAO. https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/10365

Bujaico, G., & Huayanca, D. (2022). Aplicación de simulación discreta en la estimación del número de camiones en una mina de cobre a tajo abierto [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/24461

Coral, J. (2020). Simulación del proceso de mantenimiento de camiones 797F en simulador ARENA para mejora de la disponibilidad [Tesis de bachiller, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional UTP. https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4679

Gutiérrez, F. (2014). Propuesta de optimización de la producción en la planta de agregados core material de la empresa Concretos Supermix S.A. - proyecto CVPUE mediante la técnica de simulación [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. https://core.ac.uk/download/pdf/198127767.pdf

Hernández Carrillo, C. M. (2026). Desarrollo de un simulador de eventos discretos para el análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto [Memoria de título, Universidad de Concepción].

Lins de Noronha, O., Cano Nuñez, A. E., Dos Reis, A. F., & Arroyo Ortíz, C. E. (2018). Dimensionamiento de flota en las operaciones de carguío y transporte usando modelos de simulación de sistemas. Interfases, (11), 43–55. https://doi.org/10.26439/interfases2018.n011.2952

Medina, X., & Vásquez, J. (2018). Evaluación de la operación de transporte minero usando simulación por eventos discretos en la cantera Calizas Huayco S.A. ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas – Ecuador [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Institucional ESPOL. https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48814

Morales, M. (2019). Modelamiento y simulación del minado y remanipulación de mineral en una mina a tajo abierto [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9416

Moscoso-Garcia, J., Polo-Arratea, K., Pehovaz-Álvarez, H., & Arauzo, L. (2024, 17–19 de julio). Mathematical model for fleet sizing using the match factor in an open-pit mine [Ponencia]. 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, San José, Costa Rica. https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1855

Ölmez Turan, M. (2019). Development of a dynamic maintenance algorithm with multiple scenarios: A case study for surface mining [Tesis de maestría, Middle East Technical University]. Open METU.

Padrón, J., & Mayhua, Y. (2022). Propuesta de mejora del sistema de gestión en el área de mantenimiento de palas de una empresa minera para mejorar la disponibilidad y productividad de los equipos, aplicando Mantenimiento Productivo Total (TPM) [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/659005

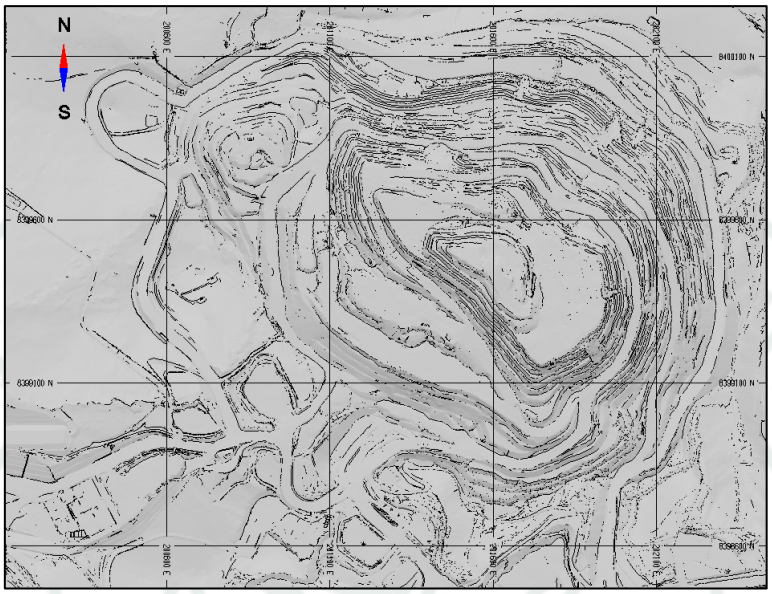
Pérez, C. (2015). Propuesta de optimización productiva para el mantenimiento y reparación de cilindros hidráulicos en una empresa metalmecánica aplicando técnica de simulación [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/2261

Ramos Buleje, G., & Rojas Flores, S. F. (2025). Propuesta de mejora en la disponibilidad de camiones subterráneos en una empresa minera aplicando la metodología RCM y la Industria 4.0 [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. http://hdl.handle.net/10757/687334

Rondón, C. (2020). Propuesta de optimización en el proceso de abastecimiento de combustible líquido a la empresa minera Cerro Verde en una empresa de transportes en la zona sur del Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10210

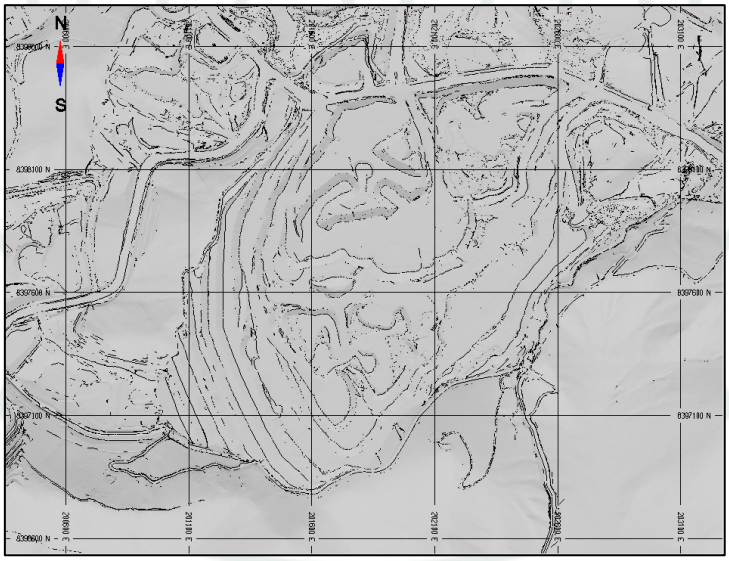
ANEXOS

Anexo 1. *Vista del tajo de la unidad minera en estudio*



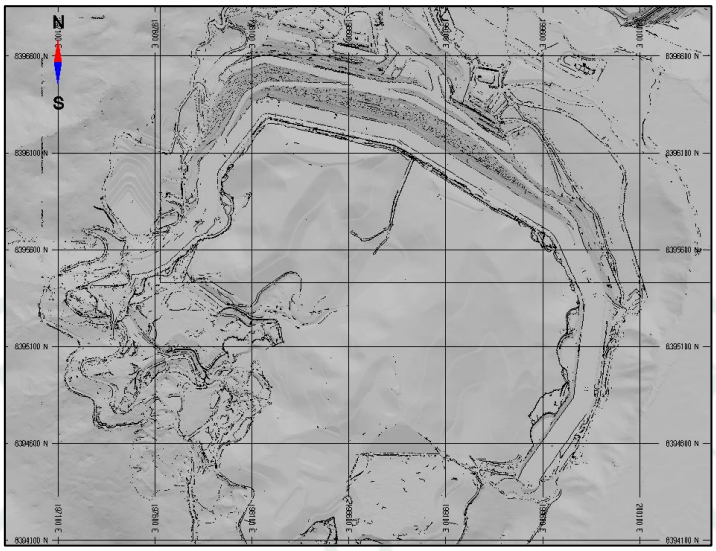
Fuente: Vista en el software mineplan

Anexo 2. *Vista del WRF y stock de la unidad minera en estudio*



Fuente: Vista en el software mineplan

Anexo 3. *Vista del TMF de la unidad minera en estudio*



Fuente: Vista en el software mineplan