



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE PLANES DE  
DESARROLLO Y PREPARACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA EN CORTO  
PLAZO BASADO EN SIMULACIÓN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

SANTIAGO XAVIER VALENCIA MORALES

PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES VARELA

PROFESOR CO-GUÍA:  
FABIÁN MANRÍQUEZ LEÓN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MIGUEL CARRASCO BRIONES  
PIERRE NANCEL-PENARD

SANTIAGO DE CHILE  
2022

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAGÍSTER EN MINERÍA**

**POR: SANTIAGO XAVIER VALENCIA MORALES**

**FECHA: 2022**

**PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE PLANES DE  
DESARROLLO Y PREPARACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA EN CORTO PLAZO  
BASADO EN SIMULACIÓN**

La planificación de corto plazo suele tener horizontes de tiempo variables. En periodos muy cortos de tiempo como un turno o un día, en el desarrollo y preparación subterránea habitualmente una persona planifica distribuyendo los recursos disponibles de forma de maximizar las actividades realizadas en ese lapso. La eficiencia de estos planes está limitada por la destreza y experiencia del planificador, lo que ha motivado estudios que apuntan a la optimización de la planificación a través de métodos computacionales. Es así como aparecen estudios que apuntan a la generación de planes optimizados que minimizan el tiempo requerido para ejecutar las actividades programadas. Sin embargo, la implementación de estos planes en minas reales puede ser complicado y costoso. Por este motivo surge la necesidad de verificar la confiabilidad de los mismos.

La metodología propuesta pretende evaluar, mediante de simulación, los planes optimizados para excavaciones horizontales de desarrollo y preparación minera subterránea. La metodología parte de la generación de planes optimizados que contienen las actividades, los frentes, los tiempos de inicio y fin, y los recursos asignados. Posteriormente, se toma la asignación de equipos en frentes, determinada por el plan y se ejecuta la simulación, para lo cual se establecen los factores de incertidumbre operacional a considerar: tiempos de trabajo, interrupciones y pérdidas operacionales por cambio de turno.

Esta metodología permite evaluar el desempeño general de las flotas de desarrollo y preparación minera subterránea, siguiendo pautas determinadas por un agendamiento e incorporando parámetros de incertidumbre.

La metodología es aplicada sobre un caso de estudio en una mina de panel caving. Para el modelado de datos se cuenta con una base de datos con información de aproximadamente un año. La base de datos es tratada para excluir datos erróneos y no representativos y se modelan las funciones de distribución tanto para los tiempos de trabajo como para interrupciones y cambios de turno. Mediante experimentos se evalúan tres alternativas de actualización del plan al existir desviaciones: sin cambios (que es el caso base), cambio a asignación dinámica (equivalente a la intervención humana) y reagendamiento optimizado. Los resultados muestran que el cumplimiento obtenido en el caso base es del 80.32% respecto al agendamiento inicial. De aquí se obtiene que la asignación dinámica presenta mejores resultados, alcanzando un 89.74% en cumplimiento, mientras que el reagendamiento optimizado da un cumplimiento de 84.06%.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN GRADE OF  
MASTER IN MINING ENGINEERING  
BY: SANTIAGO XAVIER VALENCIA MORALES  
DATE: 2022  
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

**METHODOLOGY OF ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF UNDERGROUND  
SHORT-TERM DEVELOPMENT MINE PLANNING BASED ON SIMULATION.**

Short-term planning usually has variable time horizons from months to a few hours. In very short periods of time such as a shift or a day, in underground mine development, a person usually plans by distributing the available resources to maximize the activities carried out in that period. The efficiency of these plans is limited by the skill and experience of the planner, which has motivated studies that point to the optimization of planning through computational methods. This is how studies appear pointing to the generation of optimized plans, however, the implementation of these plans in real mines can be complicated and expensive, for this reason it is needed to verify the applicability and reliability of these. In this work, this evaluation is presented through discrete event simulation.

The proposed methodology aims to evaluate, through simulation, the optimized plans for horizontal excavations in underground mine development. Methodology starts on the generation of optimized plans that contain the activities to be carried out, the fronts in which they must be executed, the start and end times, and the assigned resources. Subsequently, the assignment of equipment in fronts is taken from the schedule and the simulation is executed, for which the operational uncertainty factors to be considered are established: work times, interruptions, and operational losses due to shift changes.

This methodology allows evaluating the general performance of underground mining development fleets, following guidelines determined by a schedule and incorporating uncertainty parameters.

Methodology is applied to a case study in a panel caving mine. For data modeling, there is a database that has information for approximately one year. The database is treated to exclude erroneous and non-representative data and distribution functions are modeled for work times, interruptions, and shift changes. Through experiments, three plan update alternatives are evaluated when there are deviations: no changes, change to dynamic assignment (equivalent to human intervention) and optimized rescheduling. The results show that the compliance obtained in the case that takes the uncertainty events is 80.32 % with respect to the initial scheduling. From this it is shown that the dynamic assignment presents better results, reaching 89.74 % compliance, while rescheduling gives 84.06 % compliance.

*A mi familia.  
A quienes aún me acompañan y a quienes siempre estarán conmigo.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por la salud, la vida y las oportunidades que me sigue brindando. Por los momentos felices y las personas que me hacen seguir adelante.

A mi familia, por alimentar mi entusiasmo, por ser soporte y guía. Por la inmensa felicidad que me da sentirlos cerca, aún cuando hay distancia física.

Al Laboratorio Delphos, que me abrió las puertas y a cada uno de sus integrantes que facilitaron mucho la adaptación e integración. Particularmente por sus valiosos aportes a este trabajo, agradezco al profesor Nelson Morales, a Luis Álvarez, Pierre y Fabián.

A mis amigos, los de siempre y aquellas nuevas amistades que nacieron al iniciar este camino.

A todos aquellos que de alguna manera fueron parte de este sueño, que inicio desde hace mucho tiempo, cuando me propuse seguir estudiando. A veces uno cambia el plan pero no el objetivo.

Finalmente, agradezco al Advanced Mining Technology Center (AMTC) mediante el Fondo Basal CONICYT/PIA AFB180004 por el apoyo a este trabajo de tesis.

# Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.1.1. Objetivo general . . . . .	2
1.1.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.2. Alcances . . . . .	3
1.3. Contenido por capítulo . . . . .	3
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
2.1. Síntesis . . . . .	3
2.2. Planificación minera . . . . .	4
2.3. Producción minera subterránea . . . . .	5
2.4. Optimización en el agendamiento de producción . . . . .	5
2.5. Desarrollo y preparación minera subterránea . . . . .	7
2.6. Optimización del agendamiento en minería subterránea en corto plazo . .	11
2.7. Optimización de planes de corto plazo para desarrollo y preparación mi- nera subterránea con enfoque JSSP . . . . .	13
2.8. Simulación de eventos discretos . . . . .	14
2.9. Simulación en minería . . . . .	15
2.10. Simulación en desarrollo y preparación minera subterránea . . . . .	17
2.11. Etapas de un estudio de simulación . . . . .	18
2.12. Indicadores de operación . . . . .	20
2.12.1. Norma ASARCO . . . . .	20
2.12.2. Caracterización de la disponibilidad aplicada a simulación . . . . .	22
2.13. Indicadores de resultados . . . . .	22
2.14. Adherencia . . . . .	24
2.15. Cumplimiento . . . . .	26
<b>3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN</b>	<b>26</b>
3.1. Generación de planes para evaluar . . . . .	26
3.2. Dinámica operacional del desarrollo y preparación en minería subterránea	27
3.3. Incertidumbre operacional . . . . .	28
3.3.1. Tiempos de trabajo . . . . .	29
3.3.2. Interrupciones . . . . .	30
3.3.3. Pérdida operacional por cambio de turno . . . . .	31
3.4. Diseño de experimentos . . . . .	32
3.4.1. Verificación y validación . . . . .	32
3.4.2. Efecto de incorporar parámetros de incertidumbre operacional . .	33

3.4.3.	Variación de los parámetros de entrada en la generación de planes	33
3.4.4.	Alternativas de actualización del agendamiento inicial . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO</b>	<b>37</b>
4.1.	Descripción del estudio . . . . .	37
4.2.	Tratamiento inicial de datos . . . . .	38
4.3.	Plan JSSP . . . . .	39
4.4.	Análisis y modelado de datos . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>42</b>
5.1.	Verificación y validación . . . . .	43
5.2.	Efecto de incorporar incertidumbre . . . . .	44
5.3.	Variación de los datos de entrada para la generación de planes . . . . .	47
5.4.	Alternativas de actualización del plan tras baja adherencia . . . . .	50
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>53</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>54</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>56</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>59</b>
	<b>Anexo A. Modelo computacional</b>	<b>59</b>
A.1.	Datos de entrada . . . . .	59
A.2.	Lectura del plan . . . . .	60
A.3.	Asignación acorde al plan . . . . .	61
A.4.	Asignación dinámica . . . . .	62
	<b>Anexo B. Funciones de distribución de probabilidad</b>	<b>63</b>
B.1.	Tiempos de trabajo por actividades . . . . .	63
B.2.	Pérdida operacional por cambio de turno . . . . .	74

# Índice de figuras

1.	Métodos de excavación de chimeneas a. raise boring, b. blind hole. (Atlas Copco, 2007).	9
2.	Operaciones del ciclo de minado de una galería horizontal en panel caving (Álvarez y Morales, 2021).	11
3.	Taxonomía de un sistema (Babulak y Wang, 2010).	14
4.	Definición gráfica de tiempos según la norma ASARCO.	20
5.	Diagrama de flujo de simulación.	28
6.	Diagrama de flujo. Sin cambios en asignación de equipos.	34
7.	Diagrama de flujo. Cambio a asignación dinámica.	35
8.	Diagrama de flujo. Actualización regida por algoritmo de optimización.	37
9.	Carta Gantt agendamiento a simular.	40
10.	Variabilidad de réplicas.	43
11.	Calibración de asignación dinámica.	43
12.	Adherencia crítica.	44
13.	Carta Gantt. Réplica sin variabilidad en tiempo de cambio de turno.	45
14.	Carta Gantt. Réplica de caso base con inicio de turno variable y fallas de equipos.	45
15.	Carta Gantt. Réplica sin incorporar fallas de los equipos.	46
16.	Carta Gantt. Réplica sin incorporar fallas de los equipos ni cambio de turno variable.	47
17.	Comparativa de incorporar parámetros de incertidumbre.	47
18.	Adherencia instantánea.	48
19.	Adherencia promedio.	49
20.	Resultados y cumplimiento.	49
21.	Comparativa de actualización del agendamiento.	50
22.	Comparativa de replicas con actualizaciones del agendamiento.	51
23.	Histograma del momento de actualización del agendamiento.	52
24.	Histograma de disponibilidad en réplicas.	52
25.	Histograma de reagendamientos requeridos.	53
A.1.	Carta Gantt del plan inicial.	60
A.2.	Carta Gantt de la asignación acorde al plan.	61
A.3.	Carta Gantt de la asignación dinámica.	62
B.1.	Regado de marina - Función ajustada.	63
B.2.	Extracción de marina a acopio temporal - Función ajustada.	64
B.3.	Extracción de marina a punto de vaciado - Función ajustada.	64
B.4.	Acuñadura manual - Función ajustada.	65
B.5.	Acuñadura mecanizada - Función ajustada.	65



B.6.	Perforación de pernos helicoidales - Función ajustada. . . . .	66
B.7.	Perforación y colocación de split set - Función ajustada. . . . .	66
B.8.	Instalación y lechado de pernos helicoidales - Función ajustada. . . . .	67
B.9.	Fortificación mecanizada - Función ajustada. . . . .	67
B.10.	Instalación de malla - Función ajustada. . . . .	68
B.11.	Instalación de malla velo - Función ajustada. . . . .	68
B.12.	Hilteo de malla - Función ajustada. . . . .	69
B.13.	Proyección de shotcrete - Función ajustada. . . . .	69
B.14.	Topografía - Escáner fotografía marcación - Función ajustada. . . . .	70
B.15.	Topografía - Otros - Función ajustada. . . . .	70
B.16.	Limpieza de pata - Función ajustada. . . . .	71
B.17.	Perforación de desquinche - Función ajustada. . . . .	71
B.18.	Perforación de frente - Función ajustada. . . . .	72
B.19.	Carguío de frente - Función ajustada. . . . .	72
B.20.	Tronadura de avance - Función ajustada. . . . .	73
B.21.	Pérdida operacional por cambio de turno - Función ajustada. . . . .	74

# Índice de tablas

1.	Descripción de áreas de trabajo de la preparación minera (Camhi, 2012). . .	7
2.	Tabla resumen de experimentos. . . . .	32
3.	Actividades principales, equipos que pueden llevarlas a cabo y tiempos de trabajo promedio. . . . .	39
4.	Caso de estudio. Equipos disponibles. . . . .	40
5.	Matriz de tiempos de traslado en minutos . . . . .	41
6.	Actividades y funciones ajustadas de los tiempos en minutos. . . . .	42
7.	Tabla comparativa de incorporar parámetros de incertidumbre. . . . .	47
8.	Comparativa de actualización del agendamiento. . . . .	50
9.	Tabla comparativa de réplicas con actualizaciones del agendamiento inicial. .	51

# 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la planificación minera existen diversos estudios y avances orientados a maximizar el valor del negocio. La mayoría de ellos se ha enfocado en el largo plazo y más específicamente en la minería de cielo abierto. En el campo de la planificación minera subterránea, principalmente la investigación ha apuntado al diseño de labores, dimensionamiento de caserones y agendamiento de la producción (Musingwini, 2016). El enfoque en todos los casos es la maximización del Valor Actual Neto (VAN) en el largo plazo. Sin embargo, esta orientación omite el desarrollo y preparación minera pues asume que ya se ha ejecutado o se ejecutará sin problemas para dar paso a la producción. El retraso en la construcción de estas labores implica sin dudas problemas en el cumplimiento de la planificación de producción. El desarrollo y preparación en el corto plazo, entonces es fundamental para el cumplimiento de los objetivos planteados por la empresa.

La planificación en el corto plazo es una labor compleja que requiere de tiempo y la experticia del planificador, puesto que debe considerar restricciones de recursos, de espacio físico disponible, geomecánicas, de ventilación, etc. Hablar de corto plazo es muy relativo en cuanto al tiempo, puesto que el mismo se genera como una división del mediano plazo, y va desde un mes hasta horas (Campeau y Gamache, 2020).

El agendamiento en el muy corto plazo es el que se realiza sobre un horizonte de tiempo de un turno o un día. Se hace de forma manual y quién lo ejecuta normalmente es el supervisor a cargo, distribuyendo recursos disponibles de forma instintiva, con el objetivo de maximizar la cantidad de actividades realizadas durante el turno, enmarcándose en las labores contempladas dentro del programa semanal. La eficiencia de este agendamiento depende en gran medida de la experiencia e intuición de quién lo realiza.

En este contexto, durante los últimos años se han desarrollado trabajos que apuntan a optimizar planes de corto plazo con múltiples enfoques. El objetivo de la optimización es minimizar el lapso en que se ejecutan actividades requeridas, o bien la maximización de la utilización de equipos, lo que implica optimizar el tiempo de ejecución de las actividades del ciclo minero. Estos algoritmos generan un plan que contiene las actividades a realizar, los frentes que las requieren, los tiempos en que deben ejecutarse y los recursos asignados para este fin.

Si bien estos trabajos pretenden obtener agendamientos óptimos, aún queda pendiente verificar la aplicabilidad y confiabilidad de estos. Implementar estos planes optimizados en minas reales puede ser complicado y costoso. De esta forma, la simulación aparece como alternativa para evaluar la confiabilidad de planes generados, variando los criterios

con que se construyen.

La simulación de eventos discretos requiere incorporar la incertidumbre operacional. Para considerar esta incertidumbre se deben modelar las variaciones en los tiempos de trabajo previstos, y además identificar y modelar las interrupciones que puedan existir por diversos motivos. Ambos factores inciden en que los planes en la práctica no se cumplan, y que muchas veces requieran de cambios sobre la marcha en la ejecución, por tanto, la simulación requiere considerar las variaciones al plan, los indicadores que marcarán cambios y bajo qué criterios se realizarán estos cambios.

De esta manera se pretende construir una metodología para evaluar en laboratorio la confiabilidad de planes optimizados, usando la simulación como recurso. Esto a su vez, procura incorporar incertidumbre al proceso de optimización de planes mineros de corto y muy corto plazo de forma que se pueda valorar la robustez de estos, y generar mejores resultados de esa optimización.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Establecer una metodología para el análisis de la confiabilidad de planes de corto plazo de desarrollo y preparación minera subterránea en block/panel caving.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Proponer un método para validar, mediante simulación, planes de corto plazo en desarrollo y preparación de minería subterránea.
- Modelar duración de actividades mediante variables aleatorias, para integrar parámetros estocásticos en el proceso de validación de planes mineros de muy corto plazo.
- Identificar interrupciones y factores relevantes que inciden en el proceso de construcción de las galerías de desarrollo y preparación minera subterránea en block/panel caving para integrarlos a la simulación.
- Evaluar la robustez de los planes mineros de corto plazo usando los resultados obtenidos de la simulación.

## **1.2. Alcances**

- Se utilizarán datos tomados de una mina real para generar variables aleatorias que permitan realizar simulaciones.
- El trabajo se limita al marco de minería subterránea de block/panel caving, a planes de corto plazo de desarrollo y preparación que involucran exclusivamente excavaciones horizontales o inclinadas ejecutadas con el método de perforación y voladura.
- El horizonte de tiempo se define como muy corto plazo, es decir el alcance es de un turno o un día.

## **1.3. Contenido por capítulo**

Este trabajo está organizado en seis capítulos, además de anexos:

El primer capítulo contiene la introducción, objetivos y alcances del estudio.

El segundo capítulo captura los antecedentes tomados como referencia para el desarrollo del tema. Contiene una revisión general sobre la planificación minera subterránea de corto plazo, desarrollo y preparación minera, optimización en el agendamiento minero subterráneo y simulación de eventos discretos.

El tercer capítulo describe la metodología propuesta y aplicada más adelante para la obtención de resultados.

El cuarto capítulo comprende el caso de estudio, siendo el quinto capítulo el que contiene los resultados y su respectivo análisis.

El sexto capítulo presenta las conclusiones, y recomendaciones para los trabajos futuros derivados de este estudio.

# **2. ANTECEDENTES**

## **2.1. Síntesis**

En este capítulo, se hace una revisión general de conceptos de planificación minera, como se divide la misma tanto en función del horizonte de tiempo abarcado, como del tipo de trabajo. De acuerdo con el tipo se revisa brevemente la producción minera y los trabajos que se han desarrollado que son orientados a la optimización en este campo. Con

más detalle, se revisan los conceptos de desarrollo y preparación minera, especialmente las excavaciones horizontales por el método de perforación y voladura, que es atingente a este trabajo. Adicionalmente se toman en cuenta diversos estudios para la optimización de estas excavaciones y se hace énfasis en la optimización con el enfoque JSSP desarrollada por Álvarez y Morales (2021). Este enfoque produce como resultado los planes a evaluar en el presente caso.

La evaluación se realizará mediante la simulación de eventos discretos, por lo que se hace una exploración del concepto, de las aplicaciones en minería y además, más específicamente de los trabajos de simulación aplicados al campo del desarrollo y preparación minera subterránea.

Se hace una revisión de los indicadores de operación usados habitualmente como los indicadores ASARCO. Aquí aparecen conceptos como disponibilidad y utilización que son importantes en adelante. La disponibilidad es un factor relevante al momento de evaluar el desempeño de la flota, por esta razón se revisa su aplicación en simulación de eventos discretos mediante el tiempo entre fallas (TBF) y tiempo de reparación (TTR).

Se exploran adicionalmente distintos indicadores de adherencia aplicados en proyectos similares y finalmente se establece una medida de adherencia modificada que es útil para este caso en particular al considerar los avances de actividades en un mismo tiempo y no la diferencia de tiempos en que se completan. Además, toma todas las actividades dentro de una misma réplica.

Finalmente, se analizan las posibilidades de indicadores de resultados. A causa del horizonte corto de tiempo y de la incertidumbre implícita en la simulación no pueden usarse los indicadores aplicados en trabajos similares, por esta razón se establece la definición de fracción de próximo ciclo (FPC) como un indicador adecuado para el presente estudio. Además se define el cumplimiento en términos de FPC.

## **2.2. Planificación minera**

La planificación minera se refiere al conjunto de actividades que son orientadas a programar oportunamente, el uso eficiente de los recursos disponibles, de forma de alinearse a los objetivos estratégicos definidos por la compañía (Bustamante *et al.*, 2012).

Desde el final de los años 90, con el incremento notable de la capacidad computacional, se han presentado gran cantidad de trabajos que apuntan tanto a la optimización como a la simulación en la planificación minera con múltiples enfoques.

Habitualmente, la planificación minera se divide en tres categorías según el horizonte temporal al que corresponden: la planificación de largo plazo comprende toda la vida útil de la mina (Life of mine, LOM). La planificación de mediano plazo es el vínculo entre la planificación de largo y la de corto plazo comprendiendo un periodo de tiempo variable entre un año y tres meses. La planificación de corto plazo, por otra parte, involucra mayor detalle de las actividades a realizarse en periodos de tiempo que pueden ir desde un mes, hasta pocas horas (Campeau y Gamache, 2020).

Por el tipo de trabajo también es habitual hacer una división en dos partes: producción y desarrollo y preparación minera (Campeau y Gamache, 2020). A continuación, se presenta una descripción de ambos, y además una revisión de los trabajos de optimización relacionados a cada uno.

### **2.3. Producción minera subterránea**

La producción minera está relacionada con la extracción de mineral para alimentar a la planta de beneficio. Habitualmente las labores asociadas a esta etapa tienen alta productividad si se compara con la etapa de desarrollo y preparación. En minería subterránea son muy variables las tareas asociadas a la producción dependiendo del sistema de explotación aplicado. En los sistemas masivos como block/panel caving, las tareas de producción se asocian especialmente con el acarreo de mineral desde los puntos de extracción por medio de equipos LHD (Load Haul Dump).

Al ser la producción relacionada con la extracción de mineral y el manejo de sus leyes, esta es la etapa de mayor incidencia en el valor del negocio. Por este motivo, se han desarrollado múltiples trabajos para la optimización del agendamiento de la producción en minería subterránea, especialmente para los sistemas masivos.

### **2.4. Optimización en el agendamiento de producción**

El agendamiento de producción es una labor que tradicionalmente se ha realizado de forma manual y se centra en elegir la secuencia óptima en que serán explotadas las unidades básicas de explotación de una mina subterránea. Considerando el valor del dinero en el tiempo regido por el principio de descuento, el orden y el momento en que se extraen los caserones tiene gran incidencia en el valor descontado del proyecto (VAN). Teniendo en cuenta este antecedente, se han desarrollado numerosos trabajos orientados a la optimización de este secuenciamiento. Giffler y Thompson (1960) hacen una primera aproximación al problema del agendamiento de producción, y algoritmos para resolverlo. El problema, que no es enfocado directamente como una aplicación a minería, se resuel-

ve de acuerdo con el tamaño del problema, evaluando todas las posibles soluciones o un set de posibles soluciones seleccionadas de forma aleatoria.

Nehring y Topal (2007) presentan el problema del agendamiento de caserones resuelto con programación entera mixta, donde la función objetivo es la maximización del VAN. Más tarde, Nehring *et al.* (2012) proponen una planificación conjunta entre el mediano y el corto plazo. Esto variando la planificación tradicional, en que primero se establecen los planes de mediano plazo y luego los de corto plazo se ajustan a los primeros. Usando programación entera mixta, desarrolla un algoritmo que genera mejoras en el VAN, aunque como dato de entrada asume una capacidad fija de metros desarrollados en unidad de tiempo, por tanto, este trabajo tiene un enfoque más macro sin valorar las actividades requeridas para construir las galerías.

Rocher *et al.* (2011) incluyen el concepto del desarrollo y preparación en los planes de producción. Esto parte del hecho de que, para poder explotar una unidad básica de explotación, es indispensable construir labores de desarrollo y preparación. Para esto tiene en cuenta el uso de BIM (building information model) que es un concepto de integración de información multidimensional que abarca diversos aspectos mediante software. Si bien el BIM fue creado para la arquitectura, actualmente se usa en varias industrias, entre ellas, la minería. Los resultados son concluyentes al mostrar que hay una diferencia entre considerar la construcción de las labores de desarrollo y preparación en comparación a no considerarla.

Pourrahimian *et al.* (2012), usa programación entera mixta para generar una secuencia de extracción (tiraje) óptima para minas de block caving. Teniendo como objetivo la maximización del VAN, se genera un agendamiento que considera las labores de desarrollo y preparación ya construidas y que se limita a indicar las tasas de extracción y los tiempos de apertura y cierre de los puntos de extracción. Por otra parte, Terblanche y Bley (2015) consideran la programación entera mixta para la resolución del problema del agendamiento de producción. Para el planteamiento del problema piensan en un modelo de recursos de producción/consumo, en donde cada uno de los recursos considerados en el modelo son o bien producidos o consumidos, de forma que los mismos se pueden usar como restricciones.

Para minas de panel caving, Barboza (2019) propone considerar incertidumbre geológica para generar el agendamiento de producción. La incertidumbre se plantea con diversos escenarios simulados, cada uno con valorizaciones de bloques diferentes. Este trabajo busca comparar el agendamiento tradicional de un modelo de bloques obtenido por kriging, con dos alternativas adicionales de incorporación de incertidumbre: un es-



cenario dado por un índice de recurrencia que implica la confiabilidad de los valores de bloques usados; y un escenario pesimista con los valores más bajos de los escenarios planteados. Adicionalmente hace un comparativo entre las alternativas de dirección de minado del panel, buscando el mayor valor del negocio. Como resultado obtiene que el VAN no cambia más allá de un 1.83 % respecto al caso base del agendamiento tradicional.

## 2.5. Desarrollo y preparación minera subterránea

A menudo suelen separarse los conceptos de desarrollo y preparación minera subterránea entendiendo el desarrollo subterráneo como las excavaciones mineras que tienen como propósito acceder al yacimiento, en tanto que la preparación es entendida como el conjunto de labores, detalladas en el diseño según el sistema de explotación seleccionado, que se ejecutan continuamente con el propósito de abrir nuevas áreas a ser explotadas por la operación. Otras veces suelen juntarse los conceptos entendiendo que la incorporación de nuevas áreas a explotar implica extender las labores de desarrollo para acceder a nuevos niveles o áreas con reservas de mineral.

Camhi (2012) divide la preparación minera de una mina de block/panel caving en tres partes. La Tabla 1 expone esta segmentación describiendo excavaciones mineras, obras civiles y montaje de infraestructura.

Tabla 1: Descripción de áreas de trabajo de la preparación minera (Camhi, 2012).

Excavaciones mineras	Obras civiles	Montaje de infraestructura
Corresponden a los desarrollos horizontales y verticales y todas las actividades asociadas a estos como la fortificación de galerías, el saneamientos de éstas y la estabilización de sectores.	Son las obras cuya materialización principal es el Hormigón Armado esto es, el hormigón en sus distintas calidades y la armadura necesaria para estructurar un elemento determinado. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento. Estos últimos cumplen la función de fortificación definitiva de una zona en producción.	Esta actividad corresponde a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto determinado. Normalmente se ejecutan posteriormente a las obras civiles y culminan con la habilitación ya sea local o remota de un elemento determinado. Ejemplos de estas actividades son el montaje y habilitación de buzones de carguío y plate feeders, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

## Excavaciones mineras verticales

Las excavaciones mineras verticales, según su sentido de construcción, se dividen en piques y chimeneas. Los piques son construídos en sentido descendente mientras que las chimeneas se contruyen en sentido ascendente. En la elección del tipo de labor a construir, la fuerza de gravedad constituye una ventaja operativa a favor de las chime-neas, puesto que facilita el movimiento la roca excavada, que cae hacia la galería desde dónde se inicia su construcción y no requiere el trabajo adicional de izarse hacia el nivel superior como es el caso de la construcción de piques.

De acuerdo con las condiciones de la roca, diseño y recursos disponibles, pueden construirse de dos formas: con perforación y voladura y con máquinas de excavación de roca. Con perforación y voladura suele ser común la perforación de taladros largos con equipos simba diseñados para este fin, aunque aún es común en pequeña y mediana minería el uso de jaulas alimak para desarrollos verticales con avances cortos. La ventaja de la excavación por estos métodos es que no requieren de gran inversión de capital para ejecutarse, pero su desventaja es la baja productividad y seguridad que ofrecen.

Por su parte, los desarrollos ejecutados con máquinas de excavación de roca suelen usar dos tipos de sistemas: sistemas raise boring y sistemas blind hole. Los sistemas de raise boring requieren de dos galerías situadas en distintos niveles. Estas galerías son conectadas mediante una perforación piloto. En la galería inferior se sitúa el escariador que va en ascenso excavando la roca que cae triturada al nivel inferior, desde dónde debe ser constantemente removida para abrir espacio a la roca que cae producto del ascenso de esta excavación. La diferencia con los sistemas de blind hole radica en que estos últimos no requieren de dos galerías a conectar, si no que requieren de una única galería inferior dónde se instala el equipo electrohidráulico que perfora un taladro guía de diámetro pequeño, separado por una distancia corta del escariador que va construyendo la apertura completa. El material que cae es guiado por un colector para ser evacuado. La Figura 1 muestra los sistemas de raise boring y blind hole.

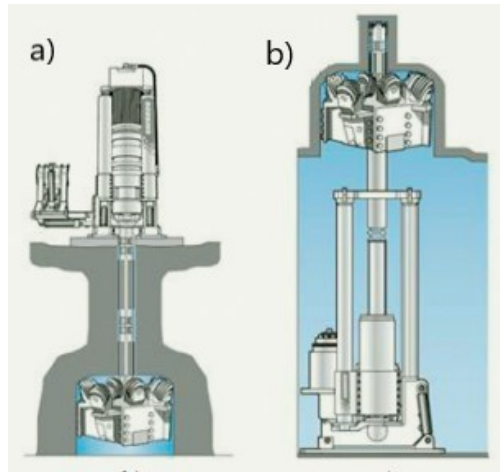


Figura 1: Métodos de excavación de chimeneas a. raise boring, b. blind hole. (Atlas Copco, 2007).

## Excavaciones mineras horizontales

Las obras más relevantes de la preparación minera corresponden a aquellas que se ejecutan en mayor cantidad, como es el caso de los desarrollos horizontales y las obras civiles (Camhi, 2012). Esta observación posiciona a las excavaciones horizontales y levemente inclinadas como aquellas de mayor importancia. De acuerdo con el sistema de explotación se pueden tener más o menos galerías por cada tonelada producida. En general los sistemas de explotación masivos requieren de menos desarrollos de este tipo por tonelada producida y aún en este caso la construcción de galerías es muy intensa en los niveles de hundimiento, producción, transporte, ventilación, etc.

En los últimos años, las excavaciones horizontales (especialmente en obras civiles), se han mecanizado mediante el uso de tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machines). Este tipo de tuneladoras ofrece un alto rendimiento en la excavación. Si bien han tenido diversas aplicaciones en la industria minera, su uso debe tener en cuenta aspectos importantes como las condiciones geológicas, profundidad con sus respectivas consideraciones geomecánicas, accesibilidad al sitio de inicio, disponibilidad de espacio para el montaje, factores de diseño de túneles como inclinación, alineación, radios de curvatura, experiencia del contratista, entre otros. (Brox, 2013).

La alternativa de excavación más usada en la industria minera es la perforación y voladura, puesto que hay mucha experiencia en el campo, brinda gran flexibilidad en cuanto al cumplimiento de los diseños y requiere de inversiones considerablemente menores a las requeridas por los sistemas de excavación mecanizados.

El uso de perforación y voladura está ampliamente extendido en la minería actual, y el mismo implica cumplir con el ciclo de minado, mismo que consiste en:

- **Perforación:** En el cual se perforan taladros con una malla definida para alojar el explosivo que permitirá la excavación.
- **Voladura:** En el cual se coloca el explosivo en las proporciones indicadas por el diseño y se detonan.
- **Ventilación:** Producto de la voladura se generan gases tóxicos que deben ser evacuados lo cual implica un tiempo de ventilación y las instalaciones adecuadas para este propósito.
- **Extracción de marina:** Consiste en remover la roca quebrada producto de la voladura, con la ayuda de equipos LHD (Load Haul Dump). Estos se remueven a puntos de acopio temporal, puntos de vaciado (traspaso a otro nivel) o directamente se cargan a camiones para ser transportados a superficie.
- **Acuñadura:** Es el proceso de eliminar las rocas que quedan colgadas en el macizo y que tienen potencial de caer, siendo un riesgo para personas y equipos.
- **Sostenimiento:** Es el proceso de asegurar toda la superficie expuesta producto del avance de la excavación, para evitar desprendimientos. Este sostenimiento puede variar según distintos parámetros como: calidad del macizo rocoso, tipo de galería, tiempo de uso de la galería, presencia de agua. Estos criterios son importantes para el diseño del sostenimiento que puede incluir colocación de malla, shotcrete o ambos. La disponibilidad de equipos también es un parámetro importante dentro de la productividad del ciclo de minado, particularmente en el sostenimiento. Si se disponen de equipos empernadores el proceso suele ser más rápido, puesto que requieren de un mismo equipo para ejecutar la perforación de taladros para pernos; inyección de resina o lechada de cemento; y la instalación de pernos y placas. Si este equipo no estuviese disponible se utiliza un jumbo para la perforación, y un equipo de levante para la instalación manual de pernos, lo cual afecta notablemente los tiempos de ejecución del sostenimiento.

Álvarez y Morales (2021) presentan un esquema del ciclo de minado aplicado para desarrollos en una mina de block/panel caving.

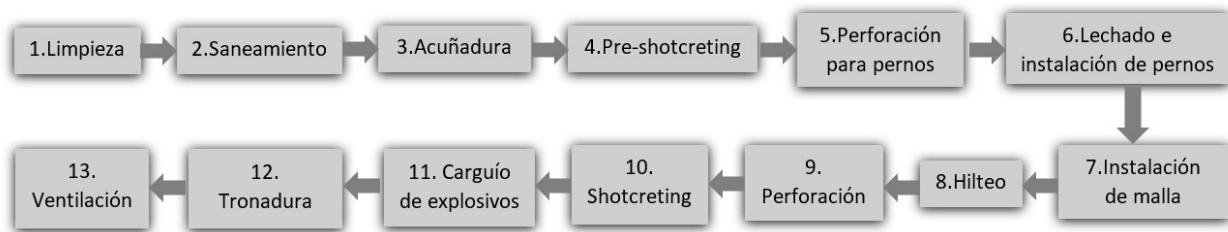


Figura 2: Operaciones del ciclo de minado de una galería horizontal en panel caving (Álvarez y Morales, 2021).

## 2.6. Optimización del agendamiento en minería subterránea en corto plazo

En los últimos años, con el impulso de nuevas tecnologías, se han reducido los costos de operación, lo que hace más atractiva a la minería subterránea. Esto conlleva al desarrollo global de este campo tanto de la industria, como de la academia. Es así como, en la última década hay trabajos orientados a optimizar los agendamientos subterráneos de corto y muy corto plazo, con múltiples enfoques y soluciones planteadas.

Paravarzar *et al.* (2018) hacen una revisión relacionada a la planificación de minas en corto plazo, tanto enfocada en el uso de simulación como a los métodos de programación matemática aplicados para resolver problemas de optimización. Es así como se revisan distintos trabajos que abordan la optimización en la producción en minería subterránea masiva, especialmente desde el punto de vista del manejo de materiales abordando tanto los costos en acarreo como los sistemas de despacho, las rutas a seguir y agendamiento de equipos de producción y acarreo para lograr las producciones establecidas.

Song *et al.* (2013) presenta una revisión de la tecnología aplicada a las operaciones de minas metálicas subterráneas. En ese trabajo propone una herramienta de optimización llamada MPRTO, a la que plantea como un organizador de turno en búsqueda del óptimo agendamiento del muy corto plazo. Si bien describe las funcionalidades, no aclara parámetros del funcionamiento de la herramienta.

Por su parte, Song *et al.* (2015) propone un enfoque de reagendamiento de equipos ante eventualidades ocurridas. Para esto, usa algoritmos para secuenciamiento, y agrupamiento de labores cercanas para asignar equipos a dichos grupos. Finalmente, el algoritmo evalúa las soluciones factibles determinando la óptima definida como la que requiere el menor tiempo en ejecutar las labores asignadas.

Tanto Schulze *et al.* (2016), como Åstrand *et al.* (2018) plantean el problema como un Flow Shop híbrido. El Flow Shop es un problema de agendamiento diseñado para una fábrica, es decir considera un flujo de distintas etapas, con un secuenciamiento establecido. Para adaptarse al problema de minería subterránea, se consideran los equipos como las etapas y los frentes como los trabajos a ser realizados por las máquinas. Schulze *et al.* (2016), hace una aplicación de este concepto en una mina de potasa, usando programación entera mixta y el uso del software CPLEX. Por otra parte, Åstrand *et al.* (2018), plantea la solución más viable con un enfoque metaheurístico, determinando que el uso de esta herramienta genera agendamientos al menos 10 % más eficientes que un agendamiento manual desarrollado por expertos en la industria. Si bien ambos trabajos plantean el problema como un Flow Shop, son diferentes a causa de cada una de las aplicaciones. La minería subterránea tiene varios sistemas de explotación que pueden emplearse y cada uno de ellos tiene actividades específicas que requieren de un planteamiento distinto.

Campeau y Gamache (2020) desarrollan un modelo de optimización para minas subterráneas por dos sistemas de explotación diferentes, el método de corte y relleno; y el método de long hole stoping. Para cada sistema, esquematiza una secuencia de actividades y una restricción de precedencias. El modelo busca maximizar los targets, es decir busca maximizar los tonelajes de aquellas galerías que están contempladas en un plan de mediano plazo.

Cortes *et al.* (2018) realizan una aplicación en minas de block caving debido a que las mismas suelen tener gran cantidad de desarrollos horizontales en espacios relativamente reducidos, dónde se requiere desarrollar todos para iniciar la producción del bloque. En este contexto tomando Chuquicamata subterránea como referencia, para un horizonte de tiempo mensual, plantea separar los desarrollos en unidades básicas de producción (BPU), que comprenden 5 frentes que son espacialmente cercanos entre sí, de forma de maximizar la utilización de recursos asignados a cada BPU. Se utilizan restricciones para la aplicación real, y presenta una metodología en que el modelo puede ser actualizado mensualmente en función de la cantidad de disparos que se han realizado en el periodo anterior.

Hou *et al.* (2020) hacen referencia al uso de algoritmos genéticos para optimizar el secuenciamiento de extracción, el tiempo en que corresponden ejecutar las actividades, las leyes del mineral extraído y la asignación de equipos. El objetivo es minimizar la brecha entre el tiempo en completar las actividades en corto plazo y el tiempo total de trabajo de los equipos lo cual implica maximizar la utilización. Además, hace un análisis de la incertidumbre en los tiempos de trabajo determinando que hay un 13.7 % de probabilidad de incrementar los tiempos para finalizar las actividades programadas de un mes.

Wang *et al.* (2020) presenta un artículo que pretende obtener el óptimo secuenciamiento de equipos mineros en el corto plazo, mediante el uso de algoritmos genéticos. Para lograrlo propone una función objetivo de maximizar la productividad y minimizar el tiempo requerido para completar  $n$  ciclos en  $m$  labores de desarrollo separadas cierta distancia entre sí. Los tiempos de cómputo mediante este algoritmo son de 20 minutos aproximadamente para un ejemplo con 5 ciclos y 5 frentes de trabajo.

## **2.7. Optimización de planes de corto plazo para desarrollo y preparación minera subterránea con enfoque JSSP**

Álvarez y Morales (2021) presentan su perspectiva al problema de la optimización del agendamiento del desarrollo y preparación minera subterránea en corto plazo. El trabajo se limita a las labores de construcción de galerías horizontales o rampas excavadas mediante el método de perforación y voladura. En este enfoque, el horizonte de tiempo no es un número determinado de ciclos como en el caso propuesto por Wang, sino que es un turno o un día, de forma de encontrar un agendamiento óptimo para el problema planteado como JSSP (Job Shop Scheduling Problem). El JSSP asemeja el problema a un taller, dónde se requieren hacer  $n$  trabajos, cada uno requiere determinadas actividades, y para atender esta necesidad se cuenta con  $m$  máquinas (Arisha *et al.*, 2001). En este caso, a diferencia del Flow Shop, no existe un orden de actividades definido, sino que el orden es un input que puede ser variable. Esto le da cierta flexibilidad en cuanto a las necesidades particulares de sostenimiento, desagüe, carguío, etc. Este planteamiento permite considerar como datos de entrada, los tiempos de traslado de equipos en función de las distancias entre los frentes.

La función objetivo es la minimización del makespan. El makespan es el intervalo de tiempo que toma completar todas las actividades en todos los frentes en el ciclo siguiente. Para buscar la solución, Álvarez y Morales plantean dos tipos de heurísticas: algoritmo genético y búsqueda tabú, encontrando que este último obtiene una solución similar en un tiempo considerablemente menor.

La metodología para la generación de planes con este enfoque, consta de tres etapas: 1) Configuración. En esta etapa se crean o definen todos los datos para la definición del problema. Este dato considera: (i) El conjunto de tareas a realizar, que contiene los frentes, operaciones unitarias, secuencia y equipo requerido (ii) el tiempo de ejecución de cada actividad, y (iii) el tiempo de viaje de cada equipo entre frente y frente. 2) Optimiza-

ción. En esta etapa se plantea el problema como un JSSP y se ejecuta la heurística de solución. 3) Salida. En esta etapa final, se recupera la solución del algoritmo genético y se construyen informes en términos de productividad y carta Gantt.

Los agendamientos optimizados con este último enfoque arrojan como resultado un plan para el ciclo siguiente (corto plazo). Este plan es un documento que contiene las actividades a realizar, el frente que las requiere, el tiempo en que se ejecutarán y los equipos (recursos) asignados para este propósito, bajo el supuesto de que cada equipo tiene un operador fijado al mismo.

El plan asegura tener una secuencia lógica y operativamente factible de actividades requeridas para cumplir con un ciclo de minado en cada frente, partiendo de distintos puntos de inicio. Es decir, lo próximo que un frente puede requerir es perforación, otro carguío de explosivos, otro sostenimiento, etc. y en cada caso se puede tener la actividad no iniciada o también una actividad en curso con cierto porcentaje de avance. Esto porque es natural concebir los turnos como continuidad de los anteriores orientados hacia un mismo fin que es la excavación de frentes que se encuentran contemplados en la planificación semanal.

## 2.8. Simulación de eventos discretos

La simulación es la imitación de la operación de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. Hecha a mano o por computadora, implica la generación de la historia artificial de un sistema, y la observación de esa historia artificial para marcar interferencias concernientes a las características de la operación en la realidad (Banks, 2005).

En la Figura 3, Babulak y Wang (2010) indica esquemáticamente las formas en que se puede estudiar un sistema y los puntos en los que aparece la simulación.

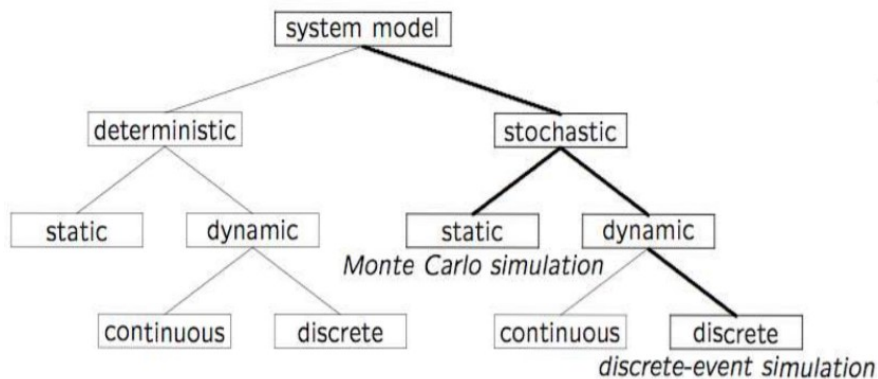


Figura 3: Taxonomía de un sistema (Babulak y Wang, 2010).



Entre los distintos tipos de simulación que se pueden utilizar está la simulación de eventos discretos la cual se basa en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Banks (2005) define la simulación de eventos discretos como el modelamiento de sistemas en los cuales el estado variable cambia únicamente en un conjunto discreto de puntos a lo largo del tiempo.

Las aplicaciones de la simulación de eventos discretos son múltiples, apareciendo en campos como la manufactura, servicios, salud, logística, transporte, distribución, aplicaciones militares, etc. La tendencia creciente a la aplicación en distintos campos ha traído el desarrollo de software especializado en simulación. Promodel, Arena y Simul8, aparecen como opciones para un rango muy amplio de aplicaciones.

En la minería también existen aplicaciones de la simulación de eventos discretos, tanto subterránea como a cielo abierto, donde el principal enfoque es el manejo de materiales en el área de producción. Aquí aparece software específico para estas aplicaciones como Delphos Simulator (DSim), HaulSim, Simio, Orchestra, entre otros.

## **2.9. Simulación en minería**

La simulación es una herramienta para la toma de decisiones que se ha aplicado ampliamente en la industria en general, y la industria minería no es la excepción, puesto que ha tenido diversas aplicaciones en este campo.

Tanto en minería a cielo abierto como en minería subterránea, la mayor aplicación de la simulación se ha centrado en la producción, especialmente en los sistemas de manejo de materiales. Es así como desde 1968, Morgan y Peterson presentan una primera aproximación al uso de la simulación de eventos discretos para el análisis del sistema minero pala-camiones en minería de cielo abierto.

Más tarde, con el desarrollo computacional, Sturgul y Eharrison (1987) presenta la posibilidad de usar programación para la solución, a través de simulación, de varios problemas relacionados con la minería superficial como: sistemas de pala-camiones con sistemas de despacho, cálculo de camiones para el caso de expansión de una mina de uranio y el uso de correas transportadoras como medio para el manejo de materiales.

Torkamani y Askari-Nasab (2013) implementan la simulación de eventos discretos mediante el software Arena, para el análisis del sistema pala-camiones en una mina de hierro, pero además considera la incertidumbre asociada con la operación y enlaza este sistema simulado con la planificación semanal de forma de incrementar el cumplimiento

y a su vez el VAN.

En la minería subterránea, Fioroni *et al.* (2014) presenta un enfoque para el uso de la simulación como herramienta de evaluación del diseño. Se evalúan cuatro alternativas de diseño, de forma en que se miden, en cada año de operación, las necesidades de capacidad del sistema de transporte para cumplir con la producción. De esta manera se puede seleccionar el layout que implique la menor necesidad de recursos para cumplir con la producción planeada.

Kumar y Huang (1993) hacen una aproximación a la confiabilidad y su importancia en la operación de minas. En la mina Kiruna en Suecia, al ser explotada por sublevel caving, requiere de gran cantidad de desarrollos para poder cumplir con la producción programada. Es por esta razón que nace la necesidad de analizar y evaluar la confiabilidad de los sistemas de producción minera. En este trabajo se identifican los aspectos que mayor impacto tienen en el sistema productivo de Kiruna, dividiendo todos los trabajos en sub-sistemas y a partir de estos se generan variables aleatorias, con que se simula el sistema productivo mediante un programa desarrollado para este propósito. Este programa de simulación ha sido de utilidad para ver la buena relación entre una buena confiabilidad y el aumento del volumen de producción en los sistemas productivos. Previamente, Kumar *et al.* (1989) habían analizado la confiabilidad en Kiruna enfocada desde el punto de vista de los equipos LHD, destacando el trabajo de mantención preventiva indispensable para ampliar el tiempo entre fallas que es el parámetro fundamental en el sistema analizado.

Rubio *et al.* (2008) hacen un acercamiento a la confiabilidad de la producción en minas de caving. Para esto consideran la simulación de eventos discretos para tomar algunos eventos comunes en minas de este tipo que interrumpen la operación normal y que deben ser considerados al calcular la capacidad de producción de minas de este tipo. En este trabajo presentan la metodología centrada en obtener gran confiabilidad integrando tanto eventos operacionales como geotécnicos, de forma de tener un dato más cercano a la realidad de la capacidad de producción que derive en planes más confiables.

Aydiner *et al.* (2006) proponen un modelo de simulación de eventos discretos, de un sistema de producción mecanizada para minería subterránea de corte y relleno. Este modelo pretende estimar tanto la producción como los costos para ciertas condiciones ingresadas como dato de entrada. Al estimar la producción bajo determinadas circunstancias, el modelo puede considerarse una aproximación al uso de la simulación para mejorar la confiabilidad de los planes mineros, pues el planificador tendría mejor calidad de información para generarlos.

## 2.10. Simulación en desarrollo y preparación minera subterránea

Diversos autores han utilizado la simulación de eventos discretos para aplicaciones en el desarrollo y preparación minera subterránea, específicamente en el desarrollo de excavaciones horizontales.

Sjödín (2015) presenta la simulación de eventos discretos con el uso del software especializado SimMine para la evaluación del desempeño de los equipos autónomos y el proceso de minado. Para esto establece indicadores como la utilización de frentes, la utilización de equipos, el tiempo que requiere un frente para completar una voladura y el número de voladuras en determinado período de tiempo. Aunque considera específicamente la secuencia de actividades para cada equipo, el horizonte de tiempo que usa es mensual.

Herazo (2018) presenta la simulación de la preparación minera horizontal en minas de block/panel caving. Toma en cuenta la variabilidad de los tiempos de trabajo, pero también las interferencias presentes entre tarea y tarea en un mismo frente. Analiza el caso de División El Teniente de CODELCO, que provee datos particulares de esa operación, esto incluye interferencias relacionadas a equipos, a frentes, y a factores externos como uso del espacio físico por parte de la empresa mandante. El horizonte temporal que toma es relativamente amplio alcanzando los 30 días, puesto que el trabajo se orienta a la cuantificación de la eficiencia del sistema constructivo de labores horizontales, en metros/mes.

Manríquez *et al.* (2020), proponen un sistema conjunto de optimización y simulación para minería subterránea partiendo del hecho de que los parámetros sujetos a incertidumbre son la causa de incumplimiento de los planes mineros. Con el uso de programación entera mixta, de forma iterativa, se producen nuevos agendamientos obteniendo en cada iteración un índice de adherencia. Este índice se reduce en la última iteración con respecto a la primera, y esto representa una mejora en la adherencia de los planes al considerar la incertidumbre operacional en la generación de planes, y de esta forma, combinar la optimización determinista con la simulación de eventos discretos.

Wang *et al.* (2020) junto con describir su propuesta de optimización, presentan la simulación como mecanismo de validación del agendamiento de la flota de equipos de desarrollo. Se establecen ciertos supuestos como una probabilidad de falla del 8 %, y una hora de paralización por falla presumiendo que ese es el tiempo promedio en reparar o reemplazar un equipo. Como resultado se obtiene que considerar las fallas de equipos con este criterio incrementa el tiempo en que se completan los trabajos entre un 3.2 y un

14.6 %, lo que marca la robustez de los agendamientos.

## **2.11. Etapas de un estudio de simulación**

Banks (2005) describe una serie de etapas a seguir para proyectos de simulación de eventos discretos. Estas etapas son descritas a continuación.

### **Formulación del problema**

Todo estudio debe comenzar con la declaración del problema que se pretende resolver. Esto debe ir acorde con los objetivos de la ejecución del proyecto de simulación. Para este caso, como se especificó en el primer capítulo se requiere cuantificar los avances en las excavaciones de desarrollo y preparación minera subterránea, guiadas por una asignación de equipos en frentes previamente establecida.

### **Establecimiento de objetivos del proyecto**

Una vez que se determina que la simulación de eventos discretos es adecuada para el caso en particular, es necesario establecer las cuestiones que el proyecto pretende resolver mediante simulación.

### **Modelo conceptual**

El modelo conceptual es la base para la construcción del modelo computacional. Este pretende establecer la lógica que ha de seguir la simulación y cada uno de los elementos que la componen.

### **Recolección y análisis de datos**

Esta etapa se desarrolla paralelamente al desarrollo del modelo conceptual y computacional teniendo un constante intercambio y retroalimentación acerca de la información necesaria para el proyecto y las fuentes de los datos.

El avance tecnológico actual aplicado en la industria minera permite capturar gran cantidad de información en tiempo real, misma que queda registrada de forma que puede ser agrupada, analizada y procesada para su uso con múltiples propósitos. En otros casos la información puede provenir de mecanismos de registro manuales. Estos registros implican el criterio y la memoria de las personas relacionadas con la operación misma, que sistemáticamente reportan la información requerida.

La información ordenada que proviene de fuentes tanto automáticas como manuales requiere de análisis y limpieza, acorde al uso que se pretende darle. Las entradas recibidas pueden contener información irrelevante o errónea que debe ser excluida o tratada previo a ser usada en cualquier propósito.

## **Modelo computacional**

El modelo computacional toma el modelo conceptual y la información disponible del análisis de datos de forma en que el modelo se acerque a la realidad.

## **Verificación**

Es el proceso en el cual se comprueba que el sistema, está funcionando adecuadamente, es decir, se comporta acorde a lo esperado al variar ciertos parámetros. En gran medida es el sentido común quién marca el adecuado comportamiento de un sistema simulado. La verificación se completa al comprobar que los parámetros de entrada y la estructura lógica del modelo se representan bien en el computador.

## **Validación**

El proceso de validación del modelo se ejecuta habitualmente mediante la calibración, un proceso iterativo en el que se compara el modelo con la realidad que el mismo pretende representar, usando las diferencias y conocimientos adquiridos para mejorar el sistema. El proceso se repite hasta obtener un nivel de precisión del sistema que se considere una adecuada representación de la realidad.

## **Diseño experimental**

En esta etapa se definen las alternativas que van a ser simuladas y que permitan tener resultados que responden a las preguntas planteadas en el establecimiento de objetivos. Para cada diseño de experimentos corresponde además decidir sobre la cantidad de réplicas a correr.

## **Pruebas numéricas y análisis**

Las corridas de producción y su respectivo análisis se usan para medir el desempeño de los sistemas diseñados y que son simulados. La cantidad de réplicas a correr debe definirse de tal manera que la variabilidad en réplicas sea insignificante.

## Documentación y reporte

Para su uso en un proyecto igual o distinto, es importante mantener documentación detallada del proyecto de simulación, del sistema diseñado, su funcionamiento, cambios realizados y resultados obtenidos. El reporte de resultados junto a su respectivo análisis debe estar orientados a responder aquellas preguntas planteadas como objetivos del proyecto.

## Implementación

Como todo proyecto de simulación, los resultados del proyecto deben cumplir la función de proveer de información que permita ser apoyo para tomar decisiones. El éxito de esta fase depende de la adecuada aplicación de las fases anteriores.

## 2.12. Indicadores de operación

### 2.12.1. Norma ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos de un equipo, máquina o instalación incurrir durante un periodo de tiempo. (CODELCO, 2005)

Tiempo Nominal				
Tiempo disponible			Fuera de servicio (M/R)	
			Programadas	Imprevistos
Tiempo operativo			Reservas	
Tiempo efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras		
		Programadas	No Programadas	

Figura 4: Definición gráfica de tiempos según la norma ASARCO.

Acorde a la figura 4, los tiempos se definen de la siguiente manera:

- **Tiempo nominal:** Espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Éste dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- **Tiempo disponible:** Espacio de tiempo en que el equipo está habilitado para ejecutar actividades.
- **Tiempo fuera de servicio:** Tiempo en que el equipo no se encuentra disponible, bien sea por mantenimientos programados o no programados.

- **Tiempo operativo:** Tiempo en que el equipo cumple con actividades asociadas a la operación.
- **Reservas:** Tiempo en que el equipo se encuentra disponible pero no está operando.
- **Tiempo efectivo:** Tiempo en que el equipo ejecuta actividades acordes a su funcionalidad.
- **Pérdidas operacionales:** Tiempo en el que los equipos no ejecutan su actividad principal por esperas.
- **Demoras:** Tiempos en los cuales el equipo no ejecuta actividades para las que fue diseñado, pueden ser demoras programadas (como cambios de turno) o no programadas (por circunstancias especiales)

A partir de esta definición de tiempos, se establecen ciertos indicadores operacionales:

- **Disponibilidad:** Es el porcentaje de horas nominales en que la flota, equipo, máquina o instalación, estuvo en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operado. Sirve para establecer la capacidad de la función de mantenimiento y establece el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación.

$$Disponibilidad[\%] = 100 * \frac{T.disponible}{T.nominal} \quad (1)$$

- **Utilización:** Es el porcentaje sobre el tiempo nominal en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Sirve para establecer la eficacia de la operación mina respecto del uso eficiente que se les da a la flota, equipo, máquina o instalación.

$$Utilización[\%] = 100 * \frac{T.efectivo}{T.nominal} \quad (2)$$

- **Utilización efectiva:** Es el porcentaje sobre el tiempo disponible en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Sirve para proveer información sobre la eficacia operacional del proceso.

$$Utilización efectiva[\%] = 100 * \frac{T.efectivo}{T.disponible} \quad (3)$$

- **Utilización operativa:** Es el porcentaje sobre el tiempo disponible en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra operativa. Sirve para proveer información sobre la capacidad excedente que está disponible.

$$Utilización Operativa[\%] = 100 * \frac{T.operativo}{T.disponible} \quad (4)$$

- **Factor de utilización:** Es el porcentaje de tiempo operativo en que el equipo realiza tareas efectivas.

$$Factor\ de\ Utilización[\%] = 100 * \frac{T.efectivo}{T.operativo} \quad (5)$$

## 2.12.2. Caracterización de la disponibilidad aplicada a simulación

Durante las operaciones mineras, pueden ocurrir distintos tipos de interrupciones y demoras a las actividades planeadas. Las interrupciones asociadas a los equipos tienen que ver con la disponibilidad de estos. Esto implica tanto mantenimiento programado como no programado.

Mena *et al.* (2013) realizan un análisis para la flota de carguío y transporte para minas de cielo abierto. Toma en cuenta dos conceptos importantes para definir la disponibilidad de equipos:

- MTBF (mean time between failures), es el tiempo medio entre fallas y representa el tiempo continuo en que un equipo está disponible.
- MTTR (mean time to repair), es el tiempo medio que tarda el equipo en volver a estar operativo tras caer en falla.

Los tiempos entre fallas (TBF) y tiempos de reparación (TTR), asociados a los conceptos de tiempos medios, son expresados como una distribución de la probabilidad, en el caso de los equipos de carguío y transporte analizados en ese artículo se determinan distribuciones weibull para TBF, y distribuciones lognormal para los TTR.

## 2.13. Indicadores de resultados

El objetivo de los desarrollos horizontales en el marco de la preparación minera es poder llegar a excavar la mayor cantidad de metros en el menor tiempo posible. Este indicador de rendimiento en metros sobre unidad de tiempo, que aparece en trabajos cuyo enfoque es mensual, no es aplicable a la escala de tiempo que representa el muy corto plazo debido a que la distancia excavada es incrementada en forma discreta cada vez que un ciclo se completa con voladura. Entonces como unidades de medida de la eficiencia de los planes, aparecen dos parámetros:

- Utilización: Este parámetro corresponde según la norma ASARCO, al tiempo en que los equipos se encuentran ejecutando un trabajo sobre el tiempo total. Este indicador aplica en este contexto entendiendo que un mayor tiempo de trabajo de los equipos representa mayores avances en las actividades necesarias en todos los frentes.



- **Frentes equivalentes:** Los frentes equivalentes propuestos por Álvarez y Morales (2021), son una alternativa para medir también el tiempo en que los equipos están ejecutando una labor. Este índice calcula que fracción aporta cada actividad al ciclo de minado, luego suma todas las actividades que se pudieron completar. De esta forma cada “frente equivalente” representa que los equipos cumplieron la cantidad de tiempo requerida para hacer un ciclo completo en un frente.

Para calcularlo, a cada actividad del ciclo  $k$  le corresponde una fracción  $\alpha_k$ :

$$\alpha_k = \frac{t_k}{\sum_{\ell} t_{\ell}} \quad (6)$$

Dónde  $t_k$  es el tiempo requerido para ejecutar la actividad. De esta forma el índice de frentes equivalentes  $\phi$  es:

$$\phi = \sum_{k \in \Lambda} \alpha_k, \quad (7)$$

Dónde  $\Lambda$  es el conjunto de actividades que han sido completadas.

## Fracción de próximo ciclo

Adicionalmente se presenta como indicador alternativo, la Fracción de Próximo Ciclo (FPC) para medir los resultados de la simulación, es decir, el desempeño de la flota. Este indicador será usado a causa de que, al integrar incertidumbre en los tiempos de trabajo, se pueden alterar los resultados de utilización sin que ello implique avances reales sobre el objetivo de completar el ciclo. Por otra parte, en la operación pueden existir frentes que requieran, por distintas causas, únicamente ciertas actividades para completar el ciclo, caso en el que se verá afectado el indicador de frentes equivalentes. La fracción del próximo ciclo se mide como la suma de las fracciones que representan los tiempos teóricos que les toma a los equipos ejecutar cada actividad requerida por cada frente, respecto del tiempo total. Se define de la siguiente forma:

Sea  $R_{i,j}$  el requerimiento de ejecutar la actividad  $i$  en el frente  $j$ . Un requerimiento es un ponderador de tiempo adimensional que corresponde a un número que indica la fracción de una actividad que se necesita completar en determinado frente, respecto al tiempo promedio que toma cumplirla. Es 1 si el requerimiento es estándar, un valor entre 0 y 1 si el requerimiento es menor (por ejemplo, cuando se requiere colocar menos pernos o extraer la marina de un disparo corto), o es mayor a 1 si el requerimiento por circunstancias operativas es mayor al estándar.

$$T_{i,j} = T_i * R_{i,j} \quad (8)$$

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{i,j} \quad (9)$$

$$FPC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{i,j} * \frac{T_{i,j}}{T_{total}} \quad (10)$$

Dónde:

- $T_{i,j}$  es el tiempo que teóricamente tomará en completar el requerimiento de la actividad  $i$  en el frente  $j$ .
- $T_i$  es el tiempo teórico que toma un equipo en completar la actividad  $i$ .
- $n$  es el número de actividades.
- $m$  es el número de frentes.
- $\lambda_{i,j}$  es la fracción completada de la actividad  $i$  en el frente  $j$ .

De esta forma si un turno cumple con todas las actividades que se requieren para completar un ciclo en todos los frentes involucrados, la fracción del próximo ciclo (FPC) será igual a 1.

## 2.14. Adherencia

La adherencia es un concepto que cuantifica las desviaciones en un agendamiento de producción de corto plazo y su ejecución. Más precisamente la adherencia de un agendamiento de producción corresponde a su capacidad de reproducirse en la realidad. (Manríquez *et al.*, 2020). El mismo autor utiliza los conceptos de *lateness*, *tardiness* y *earliness* como indicadores de adherencia de la simulación al plan evaluado. Estos conceptos son adaptados para planes mineros de corto plazo, a partir las definiciones establecidas por Baker y Trietsch (2013).

Si bien estos conceptos surgieron pensados para hacer seguimiento de agendamientos versus realidad, son aplicables para medir adherencias de una situación simulada respecto al agendamiento original.

*Lateness* se define como la diferencia entre el momento en que es completada una actividad y el momento en que se supone debió haberlo hecho según el plan. Para el caso en que se tienen distintas labores y distintas réplicas, el indicador *lateness* resulta de la sumatoria de estas diferencias relativas a todas las actividades y en todas las réplicas.

*Tardiness* corresponde al valor negativo resultante de la diferencia entre el momento en que se completa la actividad y el momento en que se supone debió hacerlo, es decir, toma un valor negativo si la actividad se completó después de lo planificado, o toma el valor de cero en caso contrario. *Earliness* corresponde en cambio, al valor positivo resultante de la misma diferencia, es decir, toma un valor positivo si la actividad se completó antes de lo planeado, o cero en caso contrario.

Manríguez *et al.* (2020) utilizan las ecuaciones 11, 12 y 13, para el cálculo de los índices de adherencia de un agendamiento en distintas réplicas.

$$Lateness = \frac{1}{|A||R|} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} C_{a,r} - C_a \quad (11)$$

$$Tardiness = \frac{1}{|A||R|} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} \max \{0; C_{a,r} - C_a\} \quad (12)$$

$$Earliness = \frac{1}{|A||R|} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} \max \{0; C_a - C_{a,r}\} \quad (13)$$

Dónde:

- $C_a$  es el tiempo en que termina la actividad  $a$  según el agendamiento.
- $C_{a,r}$  es el tiempo en que termina la actividad  $a$  en la réplica  $r$ .
- $A$  es el conjunto de actividades agendadas.
- $R$  es el conjunto de réplicas.

En el contexto de este trabajo, se requiere tomar medidas de adherencia cada cierto tiempo a lo largo de una misma réplica. Por esta razón, no es posible utilizar el concepto de *lateness* como lo define (Manríguez *et al.*, 2020). Así, la adherencia en el tiempo  $t$  se establece de la siguiente manera:

$$adh_t = FPC_{sim}^t - FPC_{ag}^t \quad (14)$$

Dónde:

- $FPC_{sim}^t$  es el valor de FPC de la simulación al momento  $t$ .
- $FPC_{ag}^t$  es el valor de FPC del agendamiento al momento  $t$ .

En la calibración de la simulación, debe definirse el valor de crítico de este indicador que marque que la simulación sufrió una desviación tal, que implique la necesidad de replantear esa secuencia de asignación de equipos en frentes.

## 2.15. Cumplimiento

Para medir el desempeño de las simulaciones en comparación con el agendamiento inicial, se establece el cumplimiento como el porcentaje de FPC de las simulaciones respecto al FPC del agendamiento inicial. La ecuación 15, muestra el cumplimiento para un experimento con  $n$  réplicas.

$$Cumplimiento[\%] = \frac{\sum_{i=1}^n FPC_{replica_i}}{n * FPC_{agendamiento}} * 100\% \quad (15)$$

## 3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología consta, por una parte, de la generación de planes, y por otra de la simulación. La simulación, empieza por la descripción de la dinámica operacional de los elementos involucrados y su aplicación en un sistema computacional. Posteriormente, se delimitan los parámetros de incertidumbre operacional a considerar y el modelado de datos de incertidumbre. Finalmente, se definen los experimentos a través de los cuales se cumplen los objetivos del trabajo.

### 3.1. Generación de planes para evaluar

Según Álvarez y Morales (2021), los planes JSSP se construyen a partir de la siguiente información:

- Lista de actividades y sus respectivos tiempos de trabajo.
- Equipos disponibles y las actividades que puede ejecutar cada uno.
- Frentes disponibles y los trabajos que requiere cada uno.
- Tiempos de traslado entre frentes.

Para generar planes, el algoritmo usa el tiempo que toma realizar cada actividad, para lo cual, en principio se usa el valor promedio. Por esta razón, para estudiar cada caso, es necesario tomar en cuenta todas las actividades y el tiempo que requieren para que un equipo pueda completarlas.

El algoritmo requiere también las actividades que se deben completar en los distintos frentes. Entonces, es necesario identificar la situación inicial de los turnos a replicar, es decir, obtener sets de frentes y los trabajos que son requeridos en ese momento, los equipos disponibles, y los tiempos de traslado entre frentes correspondientes a esa fecha. La elección de los turnos a replicar se toma con base en los siguientes criterios:

- Turnos que no tengan actividades registradas que sean ajenas al ciclo. Esto es para evitar sesgar los resultados, puesto que las labores adicionales a las principales pueden ocupar espacios, recursos o servicios que afecten al curso normal del ciclo en los frentes.
- Turnos que tengan mayor cantidad de frentes disponibles, de forma de tener un problema más complejo.
- Turnos que tengan registradas mayor cantidad de actividades ejecutadas y que puedan considerarse como de alta productividad, para ser un referente de análisis.

Estos lineamientos permiten obtener planes JSSP que serán evaluados mediante simulación de eventos discretos.

## **3.2. Dinámica operacional del desarrollo y preparación en minería subterránea**

La Figura 5 muestra el algoritmo que ha de seguir la simulación que parte del reconocimiento del plan inicial para la asignación de equipos. De esta forma cada equipo tiene una lista de frentes por recorrer. Se identifica la ubicación del equipo, si la ubicación es el primer frente de trabajo se identifica si la actividad está por iniciar o si se debe completar una actividad que ya está en curso. Así se asigna el tiempo correspondiente a la actividad (total o parcial). De acuerdo con la secuencia de frentes asignados a cada equipo se ejecutan los traslados, y para ejecutar la tarea el equipo primero se asegura que la actividad anterior se haya completado.

Los tiempos de traslado y de ejecución, sin embargo, son objeto de incertidumbre, al tener valores distintos a aquellos que se usaron para generar el plan optimizado, se generan diferencias respecto al plan. Estas diferencias serán medidas como adherencia. Si la medición de adherencia no es aceptable, se presentan distintas formas en que se puede reaccionar para actualizar el plan. Estas opciones se describen más adelante en el diseño experimental.

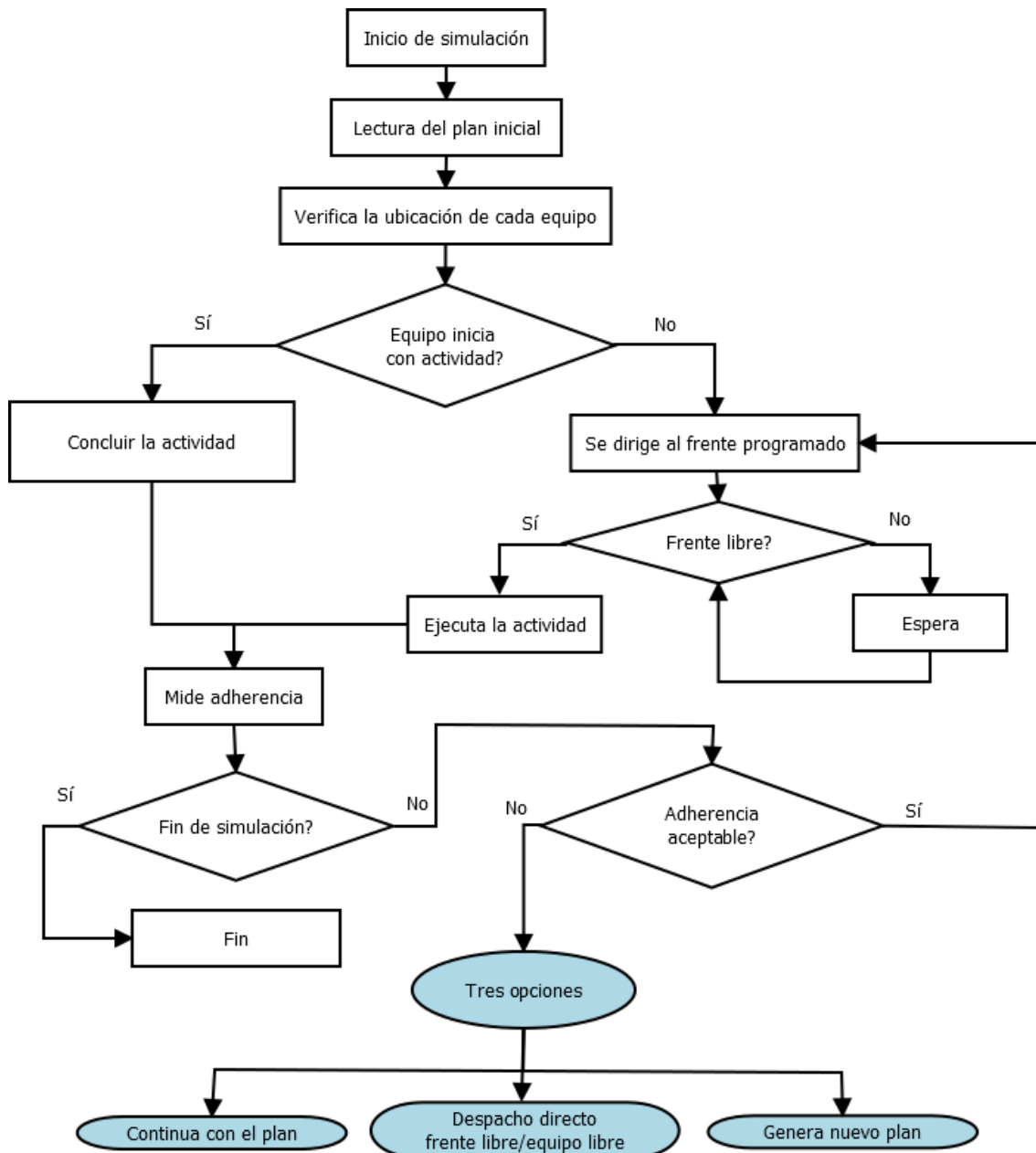


Figura 5: Diagrama de flujo de simulación.

El entorno para poder aplicar los algoritmos descritos se ha creado en lenguaje Python, utilizando programación orientada a objetos (POO) para definir las clases frentes y equipos, cada uno con los atributos inherentes a su clase. Se usa la librería Simpy, diseñada para facilitar la simulación de eventos discretos (DES). El Anexo A describe en detalle la implementación del modelo computacional.

### 3.3. Incertidumbre operacional

Los datos relevantes para aportar al modelo de simulación son aquellos que son sujetos a incertidumbre. Para el presente caso, de acuerdo con el modelo conceptual de

simulación, se consideran tanto los tiempos de trabajo como las interrupciones y las pérdidas operacionales por cambio de turno.

### **3.3.1. Tiempos de trabajo**

Cada una de las tareas a ejecutar está asociada a un tiempo de trabajo, es decir, que cada actividad tarda determinado tiempo y si bien los algoritmos de optimización de planes usan un dato fijo para el cálculo de los agendamientos, en la práctica ese tiempo de trabajo es variable por distintas causas entre las cuales se destacan:

- **Tipo de roca:** La calidad de la roca tendrá influencia en la mayoría de las actividades. Por ejemplo, una roca muy dura y abrasiva, será causa de menor velocidad de penetración, y de tiempos adicionales en cambio de brocas, tanto en perforación para voladura como en perforación para sostenimiento con pernos.
- **Presencia de agua:** Puede ocasionar retrasos en la mayoría de las actividades. Por ejemplo, en el lanzado de shotcrete o en el carguío con explosivos. Si la inclinación de la galería es negativa, el ciclo se verá afectado por la necesidad de colocar una bomba, moverla durante el ciclo y retirarla previo a la voladura.
- **Equipo:** El rendimiento de los equipos puede variar de un equipo a otro del mismo tipo, en dependencia del tiempo de vida y la calidad del mantenimiento. Esto afectará el tiempo que le toma a determinado equipo ejecutar cierta actividad.
- **Operadores:** De igual manera el tiempo para ejecutar una actividad que le toma a determinado operador, puede ser distinto al tiempo que le toma a otro en dependencia de la destreza y el entrenamiento que tenga.
- **Calidad de los insumos:** Es relevante dado que la calidad de insumos puede facilitar la ejecución de ciertos trabajos. Si bien esta afirmación es válida para todas las actividades del ciclo, es más evidente en los aceros de perforación, que pueden requerir cambios mientras el equipo está trabajando, alargando el intervalo que tarda en completar la actividad.
- **Diseño:** Los parámetros de diseño, tanto de sostenimiento como de perforación y voladura, varían la extensión del trabajo que implica cada actividad. El diseño puede variar de una labor a otra, según las condiciones, dimensiones y el propósito de cada labor que se excava.

La variabilidad que implican estos parámetros en los tiempos para ejecutar cada actividad, obliga a analizar en detalle los datos recibidos, para poder ejecutar la simulación. Los tiempos deberán ser expresados como una función de distribución de la probabilidad para implicar los parámetros variables.

Es necesario tener en cuenta que las funciones ajustadas que serán usadas en la simulación deben guardar concordancia lógica a su aplicación como tiempos de trabajo. Actualmente existe software que permite de forma automática generar los parámetros que brindan el mejor ajuste de una función en una amplia gama de funciones distintas.

Las funciones ajustadas evalúan su bondad de ajuste con distintas pruebas entre las que destaca la prueba de Kolmogorov-Smirnov, ya que brinda flexibilidad en su aplicación para distintas funciones a analizar.

### **3.3.2. Interrupciones**

Las interrupciones son parte importante para considerar en la planificación para el desarrollo y preparación minera subterránea. En relación con el presente estudio, se considera un horizonte temporal muy corto, por tanto, el factor principal que ha de tenerse en cuenta son las fallas que presentan los equipos. Para modelar estas fallas, se deben tomar en cuenta los mismos criterios de análisis, limpieza y procesamiento de datos, que fueron usados para modelar los tiempos de trabajo.

El modelamiento de los eventos de fallas y reparaciones puede ser flexible acorde a los datos disponibles. Sin embargo, es conveniente considerar un análisis detallado de la flota de equipos separado por tipo de equipo, es decir LHD, jumbos, acuñadores, elevadores, empernadores, lanzadores de hormigón, etc. Esto debido a la construcción mecánica de cada equipo que puede tener necesidades distintas de mantenimientos tanto programados como no programados, tanto en frecuencia como en tiempo de atención requerido.

En cada caso, es necesario modelar tiempos entre fallas (TBF) y tiempos de reparación (TTR) acorde al criterio que Mena *et al.* (2013) aplica para flotas de carguío y transporte en minería a cielo abierto. Sabiendo que hay notables diferencias con los equipos para minería subterránea, los datos deben ser analizados y se deben determinar estos parámetros para poder ejecutar las simulaciones.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que, al inicio de la simulación, los equipos, seguramente no vienen de alguna reparación, por ende, no se puede considerar TBF para alcanzar la primera falla. Para poder determinar este primer tiempo hasta la próxima falla, se realizarán múltiples réplicas de una simulación relacionada a los tiempos disponibles y no disponibles de cada equipo en periodos de tiempo extensos (T). Si se establece un punto aleatorio (P) en la línea temporal (uniformemente distribuido entre 0 y T), en cada réplica se toma una medición desde P hasta la próxima falla, y estos datos formarán una nueva función de distribución de probabilidad equivalente al primer tiempo entre fallas.



Adicionalmente, los frentes pueden ser motivo de interrupciones al curso normal del plan de corto plazo. Algunas causas son las siguientes:

- Seguridad: Se puede detectar alguna condición que obligue a la paralización parcial del frente hasta solventar dicha condición.
- Presencia de agua: Dependiendo de la cantidad puede ocasionar paralizaciones temporales o cambios en los parámetros de diseño de las labores excavadas.
- Sostenimiento: Deficiencias en el sostenimiento pueden derivar en cambios en el plan para poder realizar la reparación de ciertos tramos de galerías con sostenimiento deficiente.
- Infraestructura de servicios: Los servicios de aire, agua, ventilación, instalaciones eléctricas para los equipos, pueden sufrir daños que fueren la paralización de las actividades sin que ello represente cambios en el estado operativo de los equipos.

En ambos tipos de interrupciones, es conveniente tener la mayor cantidad de datos y con el mayor detalle posible, de forma en que se puedan modelar los tiempos para simular, acorde a las condiciones propias de cada operación. El análisis de datos de entrada que deriva en la forma en que se expresan los tiempos sujetos a incertidumbre, es una labor crítica para que la simulación entregue como resultado, información adecuada que permita evaluar la calidad de los planes.

### **3.3.3. Pérdida operacional por cambio de turno**

El cambio de turno es la mayor pérdida operacional en minas tanto de cielo abierto como subterráneas. En las faenas de cielo abierto es común usar “cambios de turno continuados” con una parte del personal desfasado unas horas con el propósito de asegurar la continuidad operacional en las labores críticas para evitar paralizaciones en la planta de beneficio. En las operaciones subterráneas, sin embargo, esto no siempre es factible puesto que habitualmente las voladuras se ejecutan al final del turno y se usa el cambio de turno como tiempo de ventilación.

El tiempo que transcurre entre el inicio del turno y el inicio de las actividades es variable de acuerdo con cada operación y depende también de diversos factores como la ubicación inicial de los equipos con respecto a la ubicación del frente dónde son requeridos, el grado de comunicación entre los grupos de trabajo saliente y entrante, el tamaño de la mina, el tiempo asignado a la reunión pre-turno dónde se indican las actividades asignadas, etc.

Para efectos de la simulación en el contexto de este trabajo es trascendental modelar los datos para la obtención del tiempo hasta el inicio de actividades en un turno. Si es

necesario (de acuerdo con la data disponible), se pueden separar las funciones asociadas a cada una de las actividades, entendiendo que la naturaleza de las actividades o la localización de los equipos, implican tiempos distintos hasta el inicio de las actividades en los frentes.

### 3.4. Diseño de experimentos

Esta sección se divide en cuatro sets de experimentos según el objetivo de los mismos. La Tabla 2 resume los experimentos planteados que son detallados en las secciones siguientes.

Tabla 2: Tabla resumen de experimentos.

Item	Caso
Verificación y validación	Calibración modelo
	Selección adherencia crítica
Efecto de incorporar incertidumbre	Caso base
	Sin considerar cambios de turno
	Sin considerar fallas en los equipos
Variación de datos de entrada para la generación de planes	Sin fallas de equipos ni cambios de turno
	Caso base
Alternativas de actualización del plan tras baja adherencia	Percentiles: 30,35,40,45,50,55,60,65,70
	Caso base (sin actualización)
	Asignación dinámica
	Reagendamiento JSSP

#### 3.4.1. Verificación y validación

En primer lugar, se plantean dos experimentos orientados a la verificación, validación y calibración del modelo. En principio, se toma como referencia una asignación dinámica que pretende ser el agendamiento directo de equipos en frentes determinado por el supervisor a cargo. Más adelante, en la sección 3.4.4 se describe en detalle la mecánica de este sistema de asignación. En este caso, al terminar cada actividad existe un tiempo de espera hasta agendar un equipo a su próxima tarea. Para calibrar y verificar el modelo se ejecutan réplicas para distintos tiempos de espera, hasta llegar a un resultado similar al obtenido en un caso real de asignación directa.

El segundo experimento se orienta a seleccionar el valor crítico de la adherencia, bajo el cual se establecen cambios al agendamiento inicial. Esto es debido a que normalmente en una operación minera real, se producen eventos que alteran la planificación de inicio y que obligan a modificar la asignación de equipos establecida en un inicio. En el caso

del modelo de simulación, tal y como se marca en la sección de dinámica operacional, se proponen tres alternativas de actualización del plan cuando la adherencia es menor o igual a valor crítico.

Para determinar el valor crítico de adherencia, se ejecutan réplicas para distintos valores del mismo, seleccionando aquel que obtenga buenos resultados de desempeño de flota y una cantidad de reagendamientos razonable, que pueda ejecutarse en la realidad.

### **3.4.2. Efecto de incorporar parámetros de incertidumbre operacional**

Primero, el caso base se define como el caso que incluye todos los factores de incertidumbre considerados para este caso de estudio: tiempos de trabajo, tiempo de inicio de actividades por cambio de turno e interrupciones por fallas en los equipos. Este caso representa el resultado operativo de seguir el cronograma establecido al inicio, independientemente del valor de la adherencia en cualquier momento de la simulación.

En el caso de este estudio se pretende evaluar el impacto de agregar los parámetros de incertidumbre para evaluar el plan inicial, por tanto, se ejecutan experimentos que excluyen las fallas en los equipos, pérdidas operacionales por cambio de turno y ambos, de forma de compararlos con el caso base y medir el impacto de cada uno.

### **3.4.3. Variación de los parámetros de entrada en la generación de planes**

Este set de experimentos está orientado a evaluar distintos agendamientos creados a partir de datos de entrada distintos pero ajustados a las distribuciones. Los agendamientos son generados a partir de tiempos de trabajo que varían en los percentiles de su respectiva distribución acumulada. Se analizan agendamientos creados con datos entre los percentiles 30 y 70. Adicionalmente se comparan con el caso base que es creado a partir de tiempos promedio.

### **3.4.4. Alternativas de actualización del agendamiento inicial**

Adicionalmente, se busca evaluar independientemente tres formas de manejar las desviaciones con respecto al plan inicial. Cada una de ellas representa una forma en que el supervisor a cargo puede tomar decisiones ante la necesidad de cambios sobre la marcha.

## Sin cambios en el plan inicial

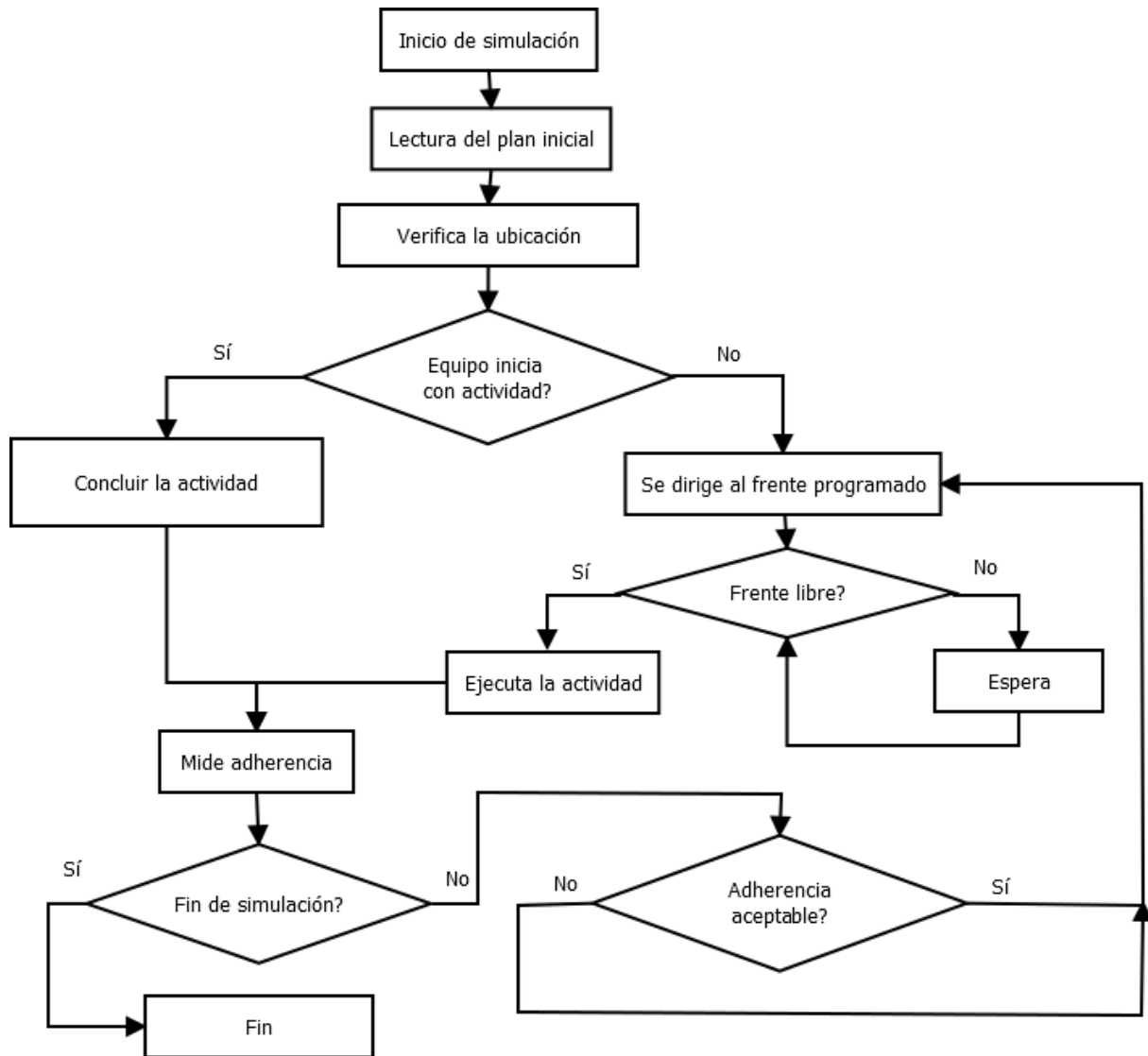


Figura 6: Diagrama de flujo. Sin cambios en asignación de equipos.

El propósito de analizar una reacción nula ante la necesidad de cambios es tener una referencia respecto a las otras alternativas. Esto supone que se pueden tener caídas en los resultados que, sin embargo, se tomarán como referencia de la confiabilidad del agendamiento de inicio. En este caso, ante una adherencia por debajo del umbral tolerable, la reacción será nula, es decir, se da continuidad a la asignación inicial marcada por el agendamiento. La Figura 6 presenta el algoritmo representado por el diagrama de flujo de la Figura 5, modificado para este caso. Aquí se muestra que tanto la adherencia aceptable como no aceptable, deriva en la continuidad de las actividades programadas de inicio.

## Asignación dinámica

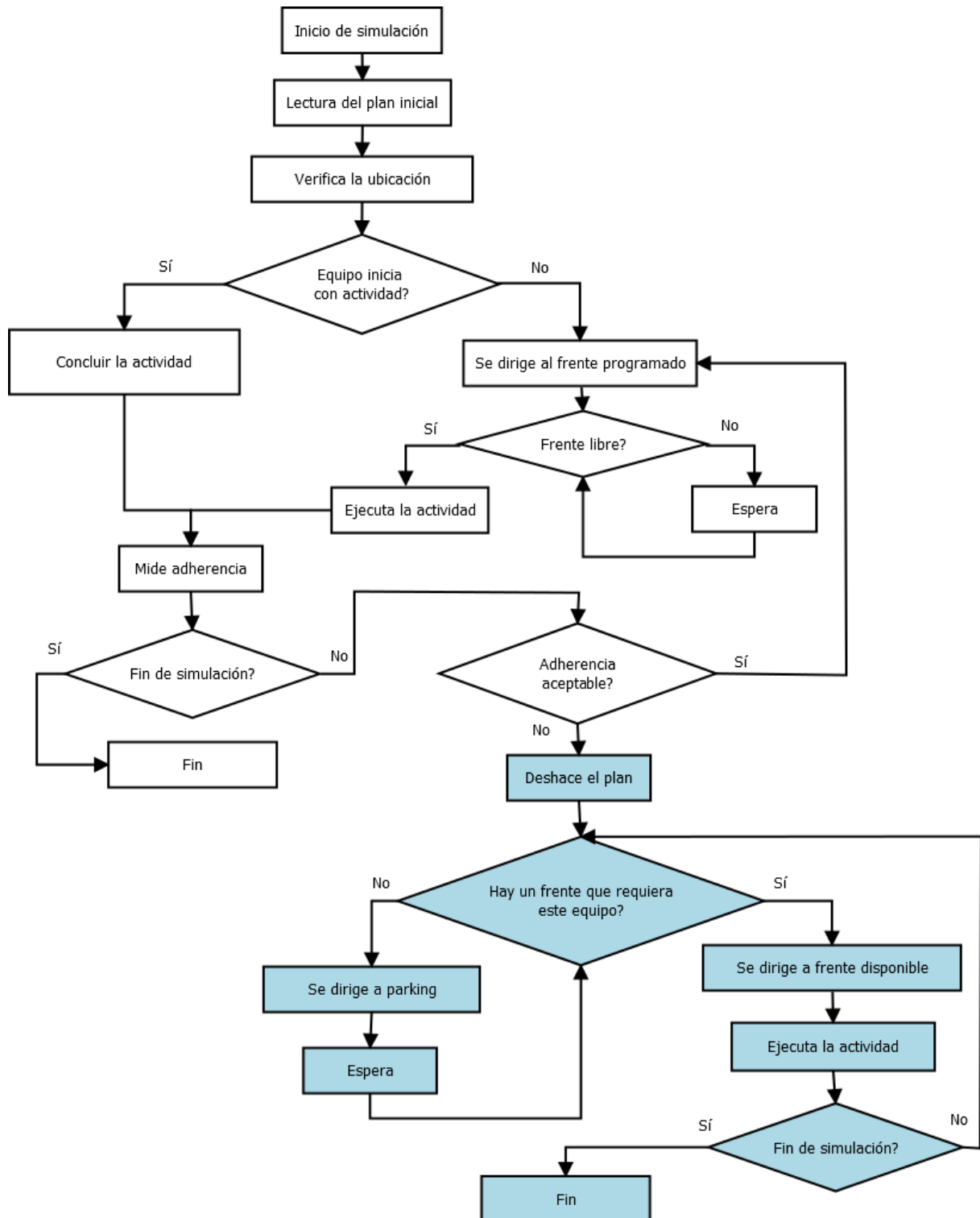


Figura 7: Diagrama de flujo. Cambio a asignación dinámica.

La segunda alternativa a evaluar será el descarte de la secuencia de equipos en frentes que fue establecida por el plan inicial. En su lugar se hace una asignación directa, cuando

un equipo (y por ende un frente) quedan libres, se identifican todos los frentes libres y a cada uno se le asigna el equipo libre que pueda completar la actividad que requiere. En caso de que no exista un equipo disponible capaz de completar la acción requerida por el frente, este entrará en espera. Si en caso contrario, existen dos o más equipos disponibles para ejecutar el trabajo requerido, se elegirá el que se encuentre más cercano al frente, lo que supone un menor tiempo de traslado. Como consecuencia, si existen más frentes que equipos disponibles, los equipos serán asignados a los frentes más cercanos, priorizando el rápido inicio de los trabajos. La Figura 7 muestra el algoritmo de asignación dinámica.

### **Generación de un nuevo plan acotado al tiempo restante**

La tercera alternativa para evaluar es que, tras determinar la necesidad de cambio se puede ejecutar otro algoritmo de optimización de forma que se genere un nuevo agendamiento optimizado teniendo en cuenta los cambios que se han dado en los distintos frentes, las nuevas ubicaciones de los equipos y un horizonte de tiempo menor, equivalente al tiempo total de simulación menos el tiempo en el cual se cambió el plan por uno nuevo. La Figura 8 presenta el algoritmo correspondiente.

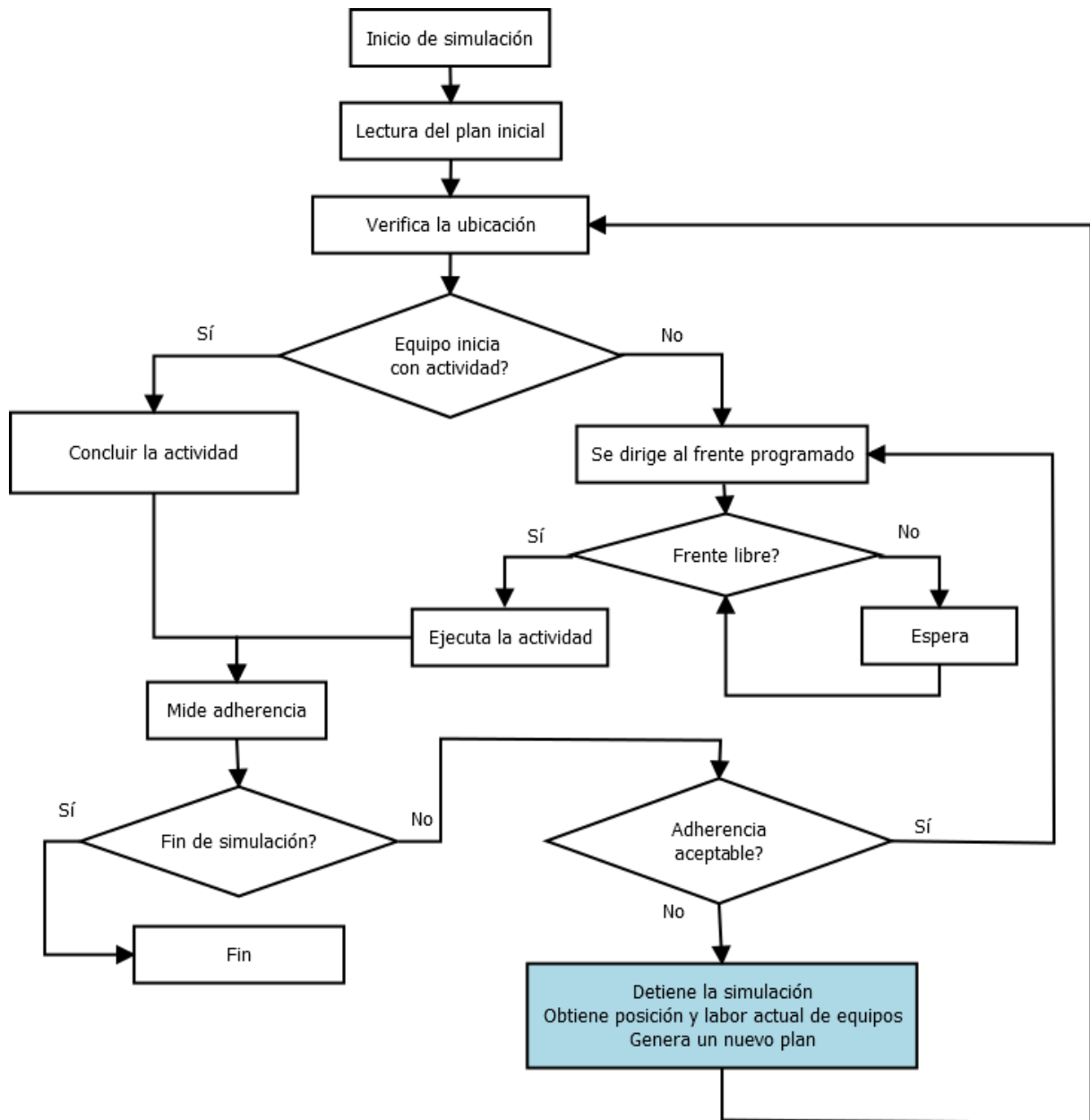


Figura 8: Diagrama de flujo. Actualización regida por algoritmo de optimización.

## 4. CASO DE ESTUDIO

### 4.1. Descripción del estudio

El presente caso de estudio considera una operación minera subterránea donde las labores de desarrollo y preparación son ejecutadas a través de una empresa contratista. La constructora es responsable de la ejecución de actividades relacionadas al desarrollo y preparación de labores horizontales, verticales y trabajos complementarios necesarios

para la explotación de una mina por el sistema panel caving.

Los datos se toman desde una base de datos que contiene información de la operación minera de desarrollo y preparación. La base de datos posee 23 460 entradas correspondientes a un lapso cercano a un año. Cada entrada contiene: frente, equipo, tipo de actividad, tiempo de inicio, tiempo de fin, observaciones, entre otros. Esta información corresponde a 707 turnos de 12 horas distintos, con una flota de entre 9 y 13 equipos disponibles en cada turno, y un total de 68 tipos de actividades distintas registradas.

Si bien todas las actividades son requeridas, gran parte de ellas son eventuales, esto implica que no son estrictamente necesarias para cumplir un ciclo de minado de un frente de desarrollo y preparación minera. En total, 20 actividades se consideran como principales o parte del ciclo, y no todas ellas son indispensables en todos los frentes, pues existen circunstancias distintas de calidad de la roca, tipo de galería, diseño, etc. Además, dependen de los equipos disponibles, por ejemplo, en la lista constan acuñadura manual y acuñadura mecanizada, que son mutuamente excluyentes y tienen tiempos de trabajo distintos.

## **4.2. Tratamiento inicial de datos**

Para el modelado de datos es indispensable contar con los tiempos de trabajo. Para obtener esta información, se ejecuta un análisis y limpieza de datos inicial, con el objetivo de tratar datos erróneos y atípicos que puedan alterar los resultados tanto de la generación de agendamientos como de la simulación de estos. Para limpiar esta información, se excluyen datos con tiempos de trabajo iguales a 0, asumiéndolos como errores de ingreso.

La base de datos es manejada en cada turno, entonces se tienen entradas con ciertas actividades inconclusas por fin de turno, o actividades que complementan la fracción realizada en el turno anterior. El criterio usado para identificar estas entradas es con palabras clave en la columna de observaciones. Esta columna posee, en general, información útil como la fracción de trabajo que ha sido completada, problemas o fallas en los equipos al ejecutar la actividad, etc. Las entradas que se descartan son aquellas que contienen palabras clave que impliquen datos que no implican una actividad completa. Esta limpieza de la base de datos excluye, para propósitos estadísticos, 998 entradas.



Tabla 3: Actividades principales, equipos que pueden llevarlas a cabo y tiempos de trabajo promedio.

Actividad	Equipos	Tiempo [min]
REGADO DE MARINA	[REGADO1,REGADO2]	26
EXTRACCIÓN DE MARINA A ACOPIO TEMPORAL	[LH-159,LH-157,LH-160]	115
EXTRACCIÓN DE MARINA A PUNTO DE VACIADO	[LH-159,LH-157,LH-160]	149
ACUÑADURA MANUAL	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	42
ACUÑADURA MECANIZADA	[]	69
PERFORACIÓN DE PERNOS HELICOIDALES	[JU-228,JU-223,JU-222]	119
PERFORACIÓN Y COLOCACIÓN DE SPLIT SET	[JU-228,JU-223,JU-222]	91
INSTALACIÓN Y LECHADO DE PERNOS HELICOIDALES	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	104
FORTIFICACIÓN MECANIZADA (PERNOS O MALLA)	[]	231
INSTALACIÓN DE MALLA	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	106
INSTALACIÓN DE MALLA VELO	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	55
HILTEO DE MALLA	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	108
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE	[RB-133,RB-135]	33
TOPOGRAFÍA - ESCANER FOTOGRAFÍA MARCACIÓN	[TOPO1,TOPO2]	48
TOPOGRAFÍA - OTROS	[TOPO1,TOPO2]	40
LIMPIEZA DE PATA	[LH-159,LH-157,LH-160,RE-DM-01]	37
PERFORACIÓN DE DESQUINCHE	[JU-228,JU-223,JU-222]	73
PERFORACION DE FRENTE	[JU-228,JU-223,JU-222]	152
CARGUÍO DE FRENTE	[MT-DM-01,MT-DM-06,MT-DM-04]	109
TRONADURA DE AVANCE	[TRONA]	9

### 4.3. Plan JSSP

De la base de datos disponible se seleccionan turnos que pueden replicarse con base en las directrices descritas en la parte metodológica. De acuerdo con los experimentos planteados, en primer lugar se genera el plan del caso base tomando en cuenta los tiempos promedio. La Tabla 3 muestra la lista de actividades consideradas, los equipos habilitados para ejecutarlas, y los tiempos de trabajo promedio.

Para el turno relacionado al caso de estudio, se han identificado 12 equipos disponibles, mismos que se describen en la Tabla 4. Adicionalmente, se agregan cuadrillas de trabajo que se encargan de ejecutar aquellas actividades que no están relacionadas con los equipos. Estas cuadrillas son para regado de marina, tronadura y topografía.

La Tabla 5 indica los tiempos de traslado en minutos tomados como inputs para la generación del plan. Esto considera una ponderación por las distancias del layout de la mina a la fecha del caso de estudio.

Para generar el agendamiento se considera un tiempo de inicio de turno de 188 minutos que es el tiempo medio que tardan los equipos en iniciar las tareas en un frente de acuerdo con los datos obtenidos. Si bien para la simulación se consideran los tiempos de

Tabla 4: Caso de estudio. Equipos disponibles.

Tipo	Equipo
Jumbo	JU-222
	JU-223
	JU-228
LHD	LH-157
	LH-159
	LH-160
Elevadores	MT-DM-01
	MT-DM-04
	MT-DM-06
Lanzadores de hormigón	RB-133
	RB-135
Retroexcavadoras	RE-DM-01
Cuadrillas de personal	REGADO1
	REGADO2
	TRONA
Topografía	TOPO1
	TOPO2

inicio de turno como variables según las funciones ajustadas a los datos existentes, para la generación de agendamientos se considera el tiempo promedio.

La Figura 9, muestra la carta Gantt con el agendamiento a simular en este caso de estudio.

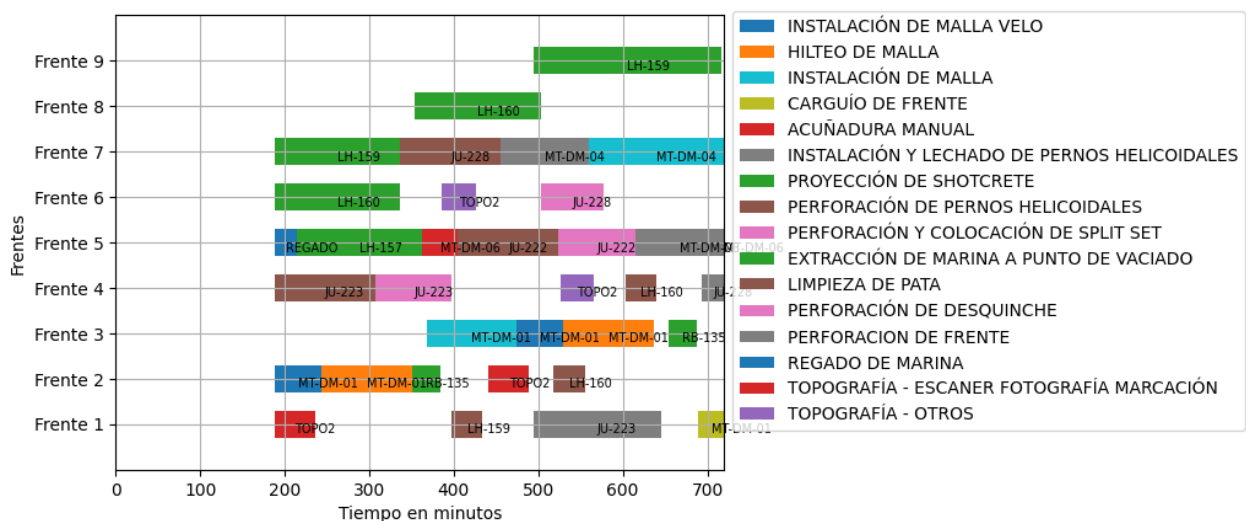


Figura 9: Carta Gantt agendamiento a simular.

Tabla 5: Matriz de tiempos de traslado en minutos

	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	Frente 7	Frente 8	Frente 9
Frente 1	0	49	43	60	34	49	60	34	60
Frente 2	49	0	17	37	17	15	37	15	48
Frente 3	43	17	0	24	37	17	24	37	24
Frente 4	60	37	24	0	39	54	1	39	1
Frente 5	34	17	37	39	0	17	39	3	34
Frente 6	49	15	17	54	17	0	48	17	54
Frente 7	34	37	24	1	39	48	0	39	1
Frente 8	34	15	37	39	3	17	39	0	39
Frente 9	60	48	24	1	34	54	1	39	0

#### 4.4. Análisis y modelado de datos

Con la base de datos tratada como se indica en la sección 4.2, se crean las funciones de distribución ajustadas a los datos disponibles. Por una parte, se modelan los tiempos de trabajo y por otra el tiempo entre el inicio de turno y el inicio de las actividades en el turno. En todos los casos se definen las funciones bajo el criterio del mejor ajuste de entre las funciones adecuadas para tiempos de trabajo, según la prueba de Kolmogórov-Smirnov con ayuda de software estadístico.

La Tabla 6 indica las funciones elegidas y los parámetros que definen las mismas, para los tiempos de trabajo de cada una de las actividades principales del ciclo de desarrollo y preparación.

Por otra parte, para el intervalo considerado como pérdida operacional por cambio de turno, se ha tomado en cuenta una sola función para todas las actividades, independientemente del frente y equipo involucrados. Esto es debido a que no existe información suficiente para modelar una función a cada actividad o a cada frente. Esta función se ha ajustado, a partir de los datos recibidos a una distribución Weibull de parámetros  $\alpha=2.225$  y  $\beta=214.17$ .

El Anexo B describe las funciones ajustadas a cada set de datos tanto de los tiempos de trabajo de cada actividad, como de los intervalos de pérdidas operacionales entre el inicio del turno y el inicio de las actividades en el mismo. Hay que notar que no todas las funciones pasan la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la bondad de ajuste. Sin embargo, son las funciones que mejor se ajustan a los datos recibidos, de entre una amplia gama de posibilidades y que además son compatibles con la naturaleza de los datos (tiempos de trabajo).

Tabla 6: Actividades y funciones ajustadas de los tiempos en minutos.

Actividad	Función	Parámetros
REGADO DE MARINA	gamma	$\alpha=3.7252$ , $\beta=6.3853$
EXTRACCIÓN DE MARINA A ACOPIO TEMPORAL	gamma	$\alpha=1.9954$ , $\beta=57.019$
EXTRACCIÓN DE MARINA A PUNTO DE VACIADO	gamma	$\alpha=2.1751$ , $\beta=68.681$
ACUÑADURA MANUAL	gamma	$\alpha=4.4013$ , $\beta=9.4595$
ACUÑADURA MECANIZADA	gamma	$\alpha=4.6205$ , $\beta=14.065$
PERFORACIÓN DE PERNOS HELICOIDALES	gamma	$\alpha=1.8929$ , $\beta=60.432$
PERFORACIÓN Y COLOCACIÓN DE SPLIT SET	gamma	$\alpha=2.6456$ , $\beta=29.303$
INSTALACIÓN Y LECHADO DE PERNOS HELICOIDALES	weibull	$\alpha=2.0086$ , $\beta=108.32$
FORTIFICACIÓN MECANIZADA (PERNOS O MALLA)	weibull	$\alpha=1.6863$ , $\beta=264.52$
INSTALACIÓN DE MALLA	gamma	$\alpha=3.6524$ , $\beta=27.213$
INSTALACIÓN DE MALLA VELO	gamma	$\alpha=4.7967$ , $\beta=11.058$
HILTEO DE MALLA	gamma	$\alpha=3.8024$ , $\beta=27.531$
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE	gamma	$\alpha=5.6995$ , $\beta=5.5092$
TOPOGRAFÍA - ESCANER FOTOGRAFÍA MARCACIÓN	gamma	$\alpha=5.1369$ , $\beta=9.2303$
TOPOGRAFÍA - OTROS	lognormal	$\sigma=0.49559$ , $\mu=3.521$
LIMPIEZA DE PATA	lognormal	$\sigma=0.50306$ , $\mu=3.3745$
PERFORACIÓN DE DESQUINCHE	lognormal	$\sigma=0.74034$ , $\mu=3.8865$
PERFORACION DE FRENTE	weibull	$\alpha=2.1523$ , $\beta=171.43$
CARGUÍO DE FRENTE	gamma	$\alpha=5.7666$ , $\beta=18.784$
TRONADURA DE AVANCE	uniform	a=1.6379 , b=18.217

Para integrar las fallas de los equipos en la simulación no se cuenta con información que permite modelar el tiempo entre fallas (TBF) y el tiempo para reparar (TTR). Sin embargo, existe el tiempo medio de mantenimiento de equipos (3.36 h) y la disponibilidad promedio (83.03 %). Para establecer el tiempo restante hasta que el equipo quede fuera de servicio la próxima vez respecto al inicio de la simulación, se toma un punto aleatorio sobre una línea temporal extensa.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar se analiza la variabilidad existente en las réplicas en términos de fracción de próximo ciclo. La Figura 10, muestra el promedio acumulado de las réplicas observadas. Como es natural existe gran variabilidad en las primeras réplicas y se va estabilizando a medida que se aumentan las réplicas. Aunque se observa una alta variabilidad a causa del horizonte temporal corto de la simulación, se puede ver un valor estable a partir de la réplica 70. Sin embargo, el tener mayor cantidad de réplicas permite tener mayor confiabilidad en los resultados. Por esta razón se tomarán 100 réplicas para todos

los casos.

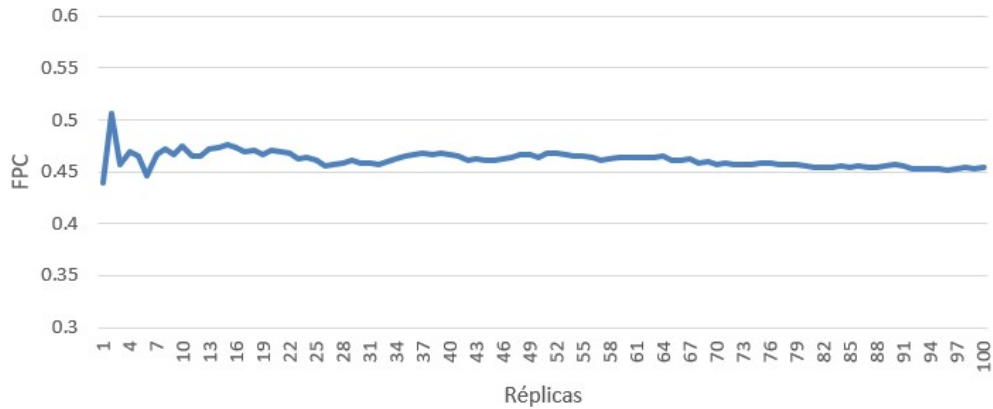


Figura 10: Variabilidad de réplicas.

## 5.1. Verificación y validación

Según con los experimentos planteados, se verifica y valida el modelo calibrando los parámetros de la simulación para asemejarse a casos reales. La Figura 11 muestra la comparación del cumplimiento de la flota en un caso real versus el desempeño obtenido en la simulación para distintos valores de tiempos de espera en asignación. De acuerdo a esto, se establecen 15 minutos como el tiempo de espera en asignación.

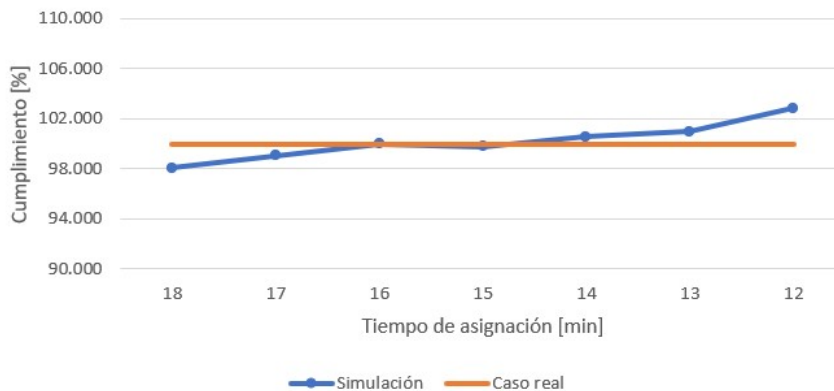


Figura 11: Calibración de asignación dinámica.

Para establecer el valor crítico de adherencia bajo el cual se ejecutan cambios al plan inicial, se han ejecutado pruebas para distintos valores de este. Con base en observaciones representadas en la Figura 12, se determina el valor de 0.85 como adecuado para este caso. Esto es debido a que en ese punto se tiene el mejor desempeño de la flota y con pocos reagendamientos requeridos. La adherencia crítica de 0.85 es el punto de inflexión a partir del cual, la curva de desempeño de la flota decae y esto se entiende como

consecuencia de que una adherencia crítica muy alta, implica gran cantidad de reagendamientos que a su vez, se reflejan en pérdidas operacionales por traslados.

El valor de 0.85 en adherencia crítica quiere decir que la tolerancia a las desviaciones respecto del agendamiento inicial es del 15 %.

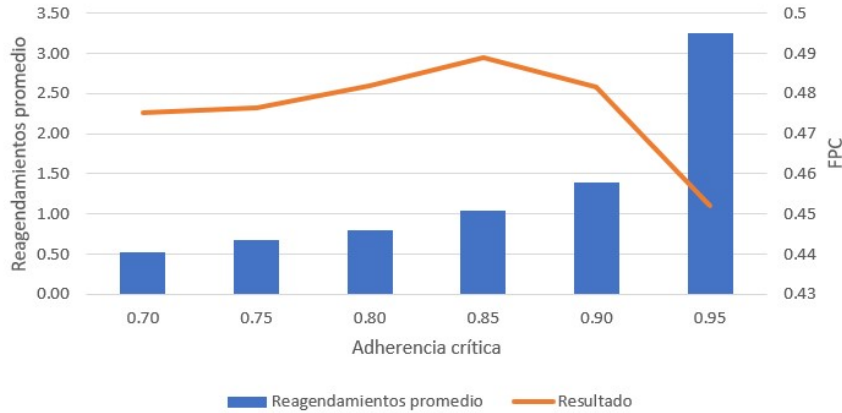


Figura 12: Adherencia crítica.

## Caso base

Inicialmente se define el caso base que es el caso que incluye todos los factores de incertidumbre considerados para este caso de estudio: tiempos de trabajo, tiempo de inicio de actividades por cambio de turno e interrupciones por fallas en los equipos. Este caso representa el resultado operativo de seguir el agendamiento establecido de inicio. Tras analizar 100 réplicas, se llega a un cumplimiento del 80.32 %.

## 5.2. Efecto de incorporar incertidumbre

### Incorporación de variabilidad en tiempo de cambio de turno

La Figura 13 muestra una carta gantt representativa de una réplica en que se toma el tiempo de inicio de actividades tras iniciar el turno como constante e igual al promedio de los datos recibidos (188 minutos). Por su parte, la Figura 14 muestra la carta gantt de una réplica del caso base en que existe la variabilidad correspondiente a la incorporación de incertidumbre para el parámetro analizado, a través de su respectiva función ajustada.

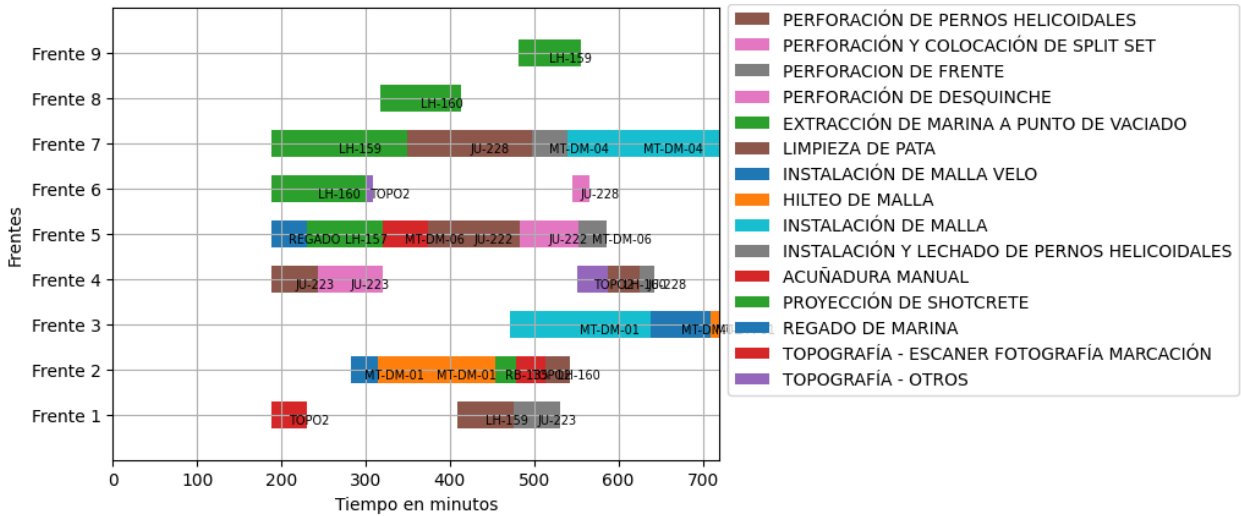


Figura 13: Carta Gantt. Réplica sin variabilidad en tiempo de cambio de turno.

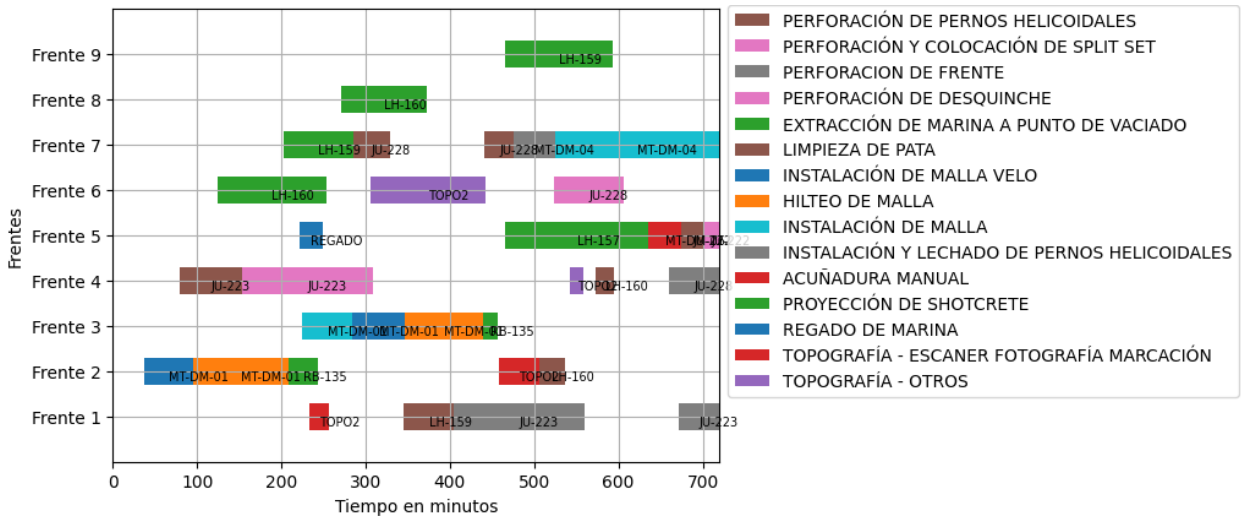


Figura 14: Carta Gantt. Réplica de caso base con inicio de turno variable y fallas de equipos.

La Tabla 7 y la Figura 17 muestran los resultados de analizar el total de las réplicas en cada situación. Se determina un cumplimiento respecto del agendamiento inicial que es 3.59% mayor en el caso que no considera las pérdidas operacionales variables. Los experimentos muestran que el impacto de incorporar el tiempo de cambio de turno como una variable no es un factor relevante. Sin embargo, esto depende de cada operación y de la amplitud que otorgue la función ajustada a los datos.

### Incorporación de fallas de equipos

La Figura 15 representa la carta gantt de una réplica en que no se toman en cuenta las fallas de equipos, es decir, se trabaja bajo el supuesto de que los equipos que se

encuentran disponibles al iniciar el turno y que son agendados, no caen en fallas mecánicas que corten su trabajo hasta su reparación. Este caso se compara con el caso base. Por ejemplo, en la réplica representada en la Figura 14, se pueden observar equipos que caen en falla. En esta réplica, en el Jumbo JU-228 trabajando en el frente 7, se evidencia un corte en la actividad y la reanudación de esta tras la reparación del equipo.

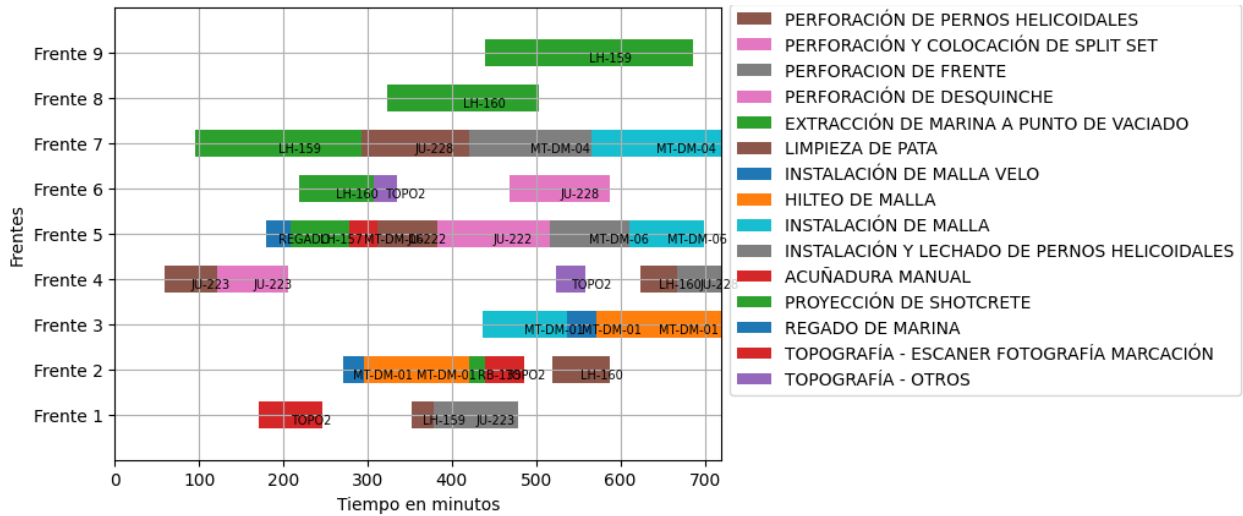


Figura 15: Carta Gantt. Réplica sin incorporar fallas de los equipos.

Tanto en la Tabla 7 como en la Figura 17 se observa la notable relevancia de la incorporación de fallas al análisis. La diferencia en cumplimiento es de 18.76 %.

Cuando no se toman en cuenta fallas de equipos ni la variabilidad en el tiempo de cambio de turno, situación que se evidencia en la Figura 16 que representa una réplica de este caso, el cumplimiento simulado supera el agendamiento inicial llegando al 101.22 %. El cumplimiento superior al 100 % representa que se ejecutaron más actividades que aquellas que estuvieron programadas. Esto se debe a que los tiempos de trabajo simulados son inferiores a aquellos que se usaron para la generación del plan evaluado.

Las diferencias notables con el caso base (20.90 %) marcan la necesidad de tomar en cuenta todos los aspectos en la planificación semanal, para tener valores aterrizados en cuanto a la capacidad de la flota para ejecutar las labores de desarrollo planificadas.



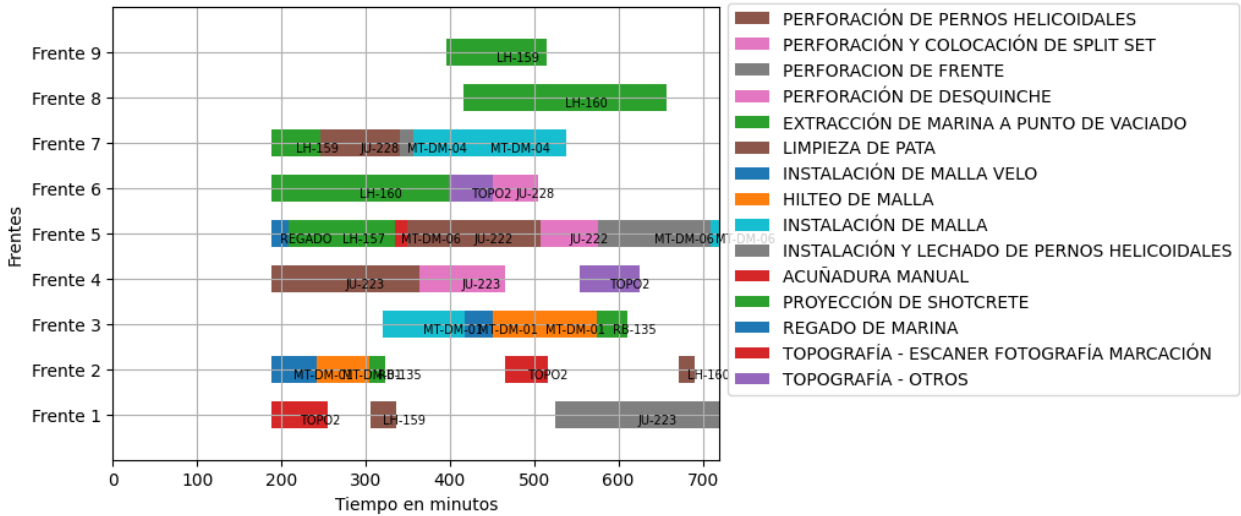


Figura 16: Carta Gantt. Réplica sin incorporar fallas de los equipos ni cambio de turno variable.

Tabla 7: Tabla comparativa de incorporar parámetros de incertidumbre.

Caso	FPC	Cumplimiento [%]
Caso base	0.4544	80.32
Caso sin cambio de turno variable	0.4748	83.92
Caso sin fallas de equipos	0.5589	98.78
Caso sin fallas ni cambio de turno variable	0.5727	101.22

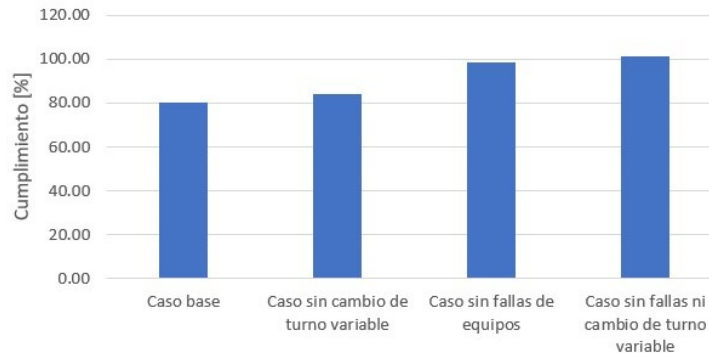


Figura 17: Comparativa de incorporar parámetros de incertidumbre.

### 5.3. Variación de los datos de entrada para la generación de planes

La Figura 18 muestra la adherencia instantánea a lo largo del tiempo de simulación, para distintos planes generados variando los tiempos de trabajo con que son construidos.

Los casos estudiados son los percentiles de las respectivas distribuciones y el caso base creado a partir de un plan generado con tiempos promedio. Los valores mostrados para cada caso son un promedio de todas las adherencias medidas en el mismo momento, pero en distintas réplicas.

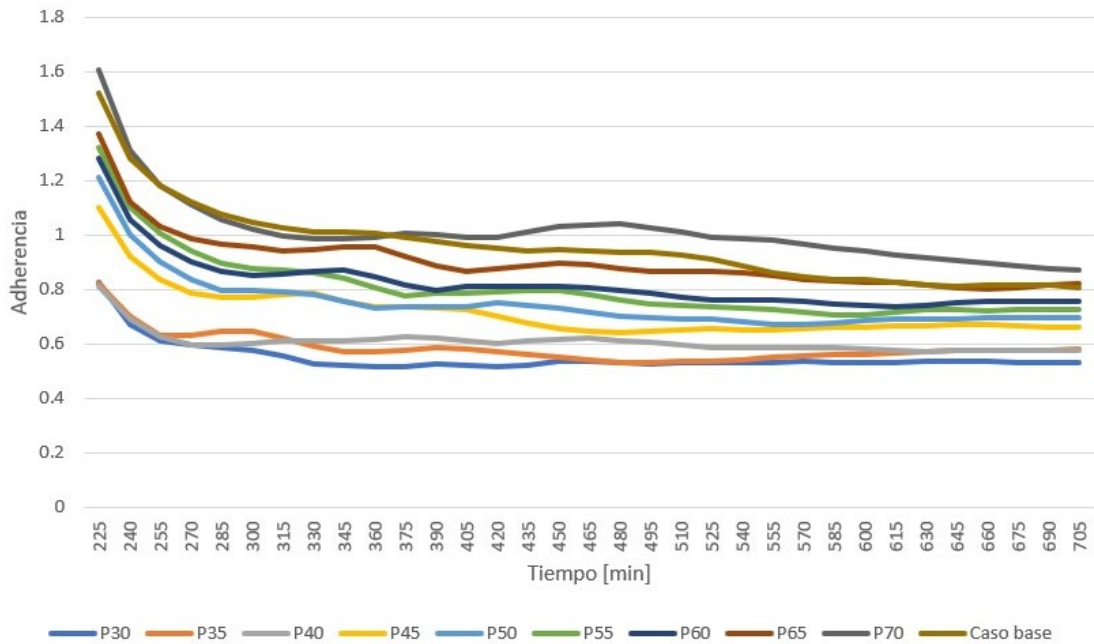


Figura 18: Adherencia instantánea.

Las curvas de adherencia muestran una tendencia a estabilizarse a medida que transcurre el tiempo. En la mayoría de los casos se tiene una tendencia horizontal a partir del minuto 360 (mitad de la simulación). Sin embargo, el caso base presenta alta variabilidad con valores altos de inicio y caídas hasta el minuto 600. La tendencia horizontal de los agendamientos creados con tiempos de trabajo marcados por los percentiles de sus distribuciones, son indicadores de un buen ajuste del agendamento con la simulación a nivel general, no así a nivel particular en que los parámetros y eventos aleatorios en determinada réplica pueden incidir positiva o negativamente en la adherencia y el desempeño de la flota.

La Figura 19 muestra para los distintos casos la adherencia general de la simulación, expresada como la media de las adherencias instantáneas promedio exhibidas en la Figura 18.

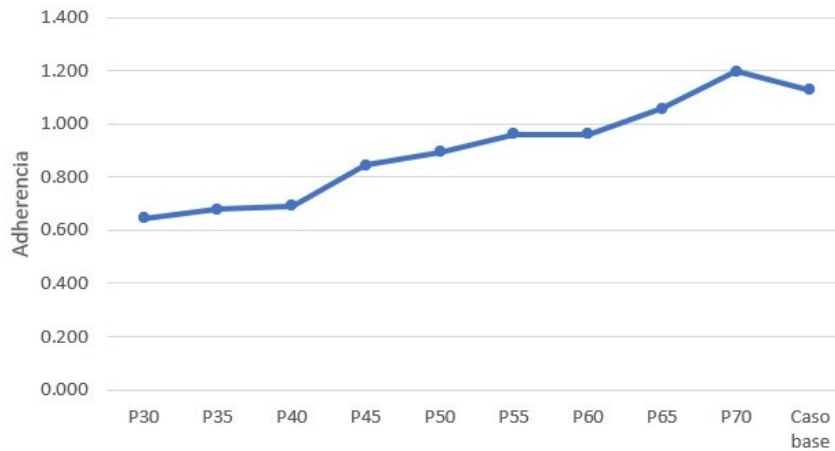


Figura 19: Adherencia promedio.

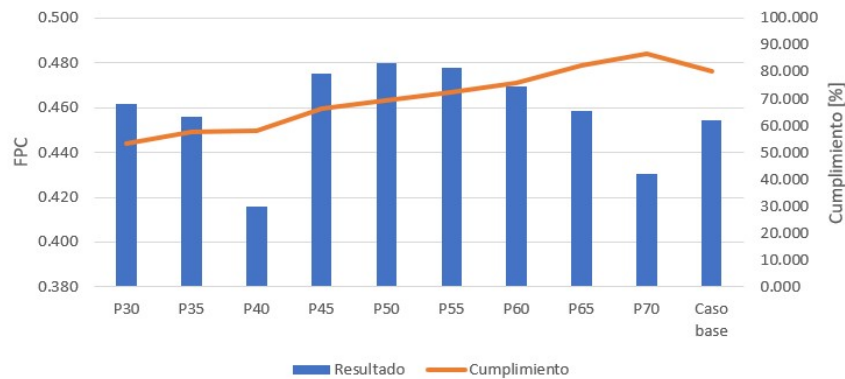


Figura 20: Resultados y cumplimiento.

Generar agendamientos con tiempos de trabajo muy cortos como es el caso del percentil 30 (P30) sugiere que las simulaciones no van a cumplir con el plan. Por ende, se obtienen cumplimientos y adherencias bajas. Por otra parte, generar agendamientos que consideren tiempos de trabajo muy altos, obtiene un cumplimiento alto sin que ello represente que efectivamente se ejecutan más actividades de avance en los frentes. Esto se ve en las columnas de resultados de la Figura 20, donde se nota que por el contrario las simulaciones de los planes creados con tiempos extensos tienen peores resultados. Esto se interpreta como consecuencia de que esos agendamientos tienen menos flexibilidad en la asignación de equipos. Al suponer tiempos de trabajo muy altos, se puede creer falsamente que es conveniente asignar un equipo a un frente muy lejano cuando en verdad puede asignarse a otro menos distante que tiene un equipo por finalizar su tarea.

El caso base creado a partir de valores promedio, tiene valores moderados tanto en resultado como en cumplimiento y adherencia. Sin embargo, de acuerdo con los resultados y a las tendencias claras en cumplimiento y adherencia, los mejores resultados en términos de FPC se dan con agendamientos que consideran tiempos de trabajo cercanos

a la mediana, entre los percentiles 50 y 55.

## 5.4. Alternativas de actualización del plan tras baja adherencia

La Figura 21, muestra la comparativa en términos de cumplimiento de las tres alternativas de actualización del agendamiento ante una baja adherencia en el transcurso de cada réplica de la simulación. El caso en que no se tiene actualización es el caso base de las secciones anteriores, y presenta un cumplimiento promedio del agendamiento inicial del 80.32 % aun cuando no se toma acción ante una adherencia baja. Como es esperado, al tomar acciones cuando existen caídas en adherencia por debajo del umbral establecido en 85 %, el cumplimiento mejora tanto si se produce un reagendamiento como si se cambia a una asignación dinámica.

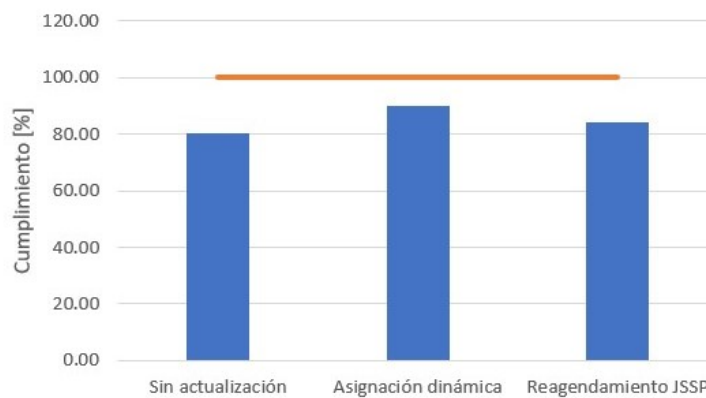


Figura 21: Comparativa de actualización del agendamiento.

Tabla 8: Comparativa de actualización del agendamiento.

Casos	Simulación FPC	Plan FPC	Cumplimiento [%]
Sin actualización	0.4544	0.5658	80.32
Asignación dinámica	0.5077	0.5658	89.74
Reagendamiento JSSP	0.4756	0.5658	84.06

En promedio, el 69.5% de las réplicas requieren de una actualización del agendamiento inicial. La Figura 22, muestra una comparativa de las réplicas que requieren actualización del plan. En este gráfico se comparan dos tipos de experimentos, uno que no incorpora fallas de los equipos y otro que sí considera estas interrupciones. Se puede observar un comportamiento distinto en cada caso. En el primer caso existe un desempeño superior en el reagendamiento JSSP, mientras que en el segundo caso la asignación

dinámica es la opción que da mejores resultados. Aunque debiera considerarse la última como la más cercana a una operación real, es relevante la información obtenida del experimento sin considerar que los equipos fallen.

Cuando un equipo falla y requiere de una atención prolongada, es conveniente tomar alguna decisión para reemplazar el equipo inmediatamente. Esto es automático en la asignación dinámica puesto que no está limitada a una adherencia baja. Por el contrario, generar un algoritmo de optimización para reagendamiento está sujeto a que la falla afecte considerablemente al desempeño del turno, para que su adherencia baje del umbral y pueda ejecutarse el reagendamiento. En este sentido hace falta el criterio humano, por lo que es recomendable ejecutar pruebas en mina del reagendamiento, utilizando criterio experto respecto a cuando aplicar el mismo.

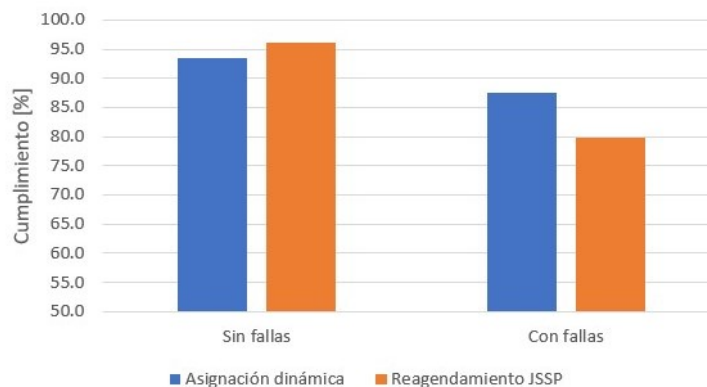


Figura 22: Comparativa de replicas con actualizaciones del agendamiento.

Tabla 9: Tabla comparativa de réplicas con actualizaciones del agendamiento inicial.

Casos	Cumplimiento [%]	
	Sin fallas	Con fallas
Asignación dinámica	93.4	87.5
Reagendamiento JSSP	96.2	79.9

En la Figura 23 se analiza a través de un histograma, el momento en el que es requerida una actualización del agendamiento, tanto en el cambio a asignación dinámica como en el reagendamiento JSSP. Se puede notar que hay una tendencia a requerir cambios cuando el turno está iniciando. Esto se interpreta como una causa de la alta variabilidad que existe en los tiempos de pérdida operacional por cambio de turno. Si existen retrasos prolongados en frentes que requieran de varias actividades, todas ellas se van a ver

retrasadas. Se van a formar colas de equipos esperando trabajar y va a existir una caída en el desempeño general de la flota y en la adherencia al agendamiento inicial.

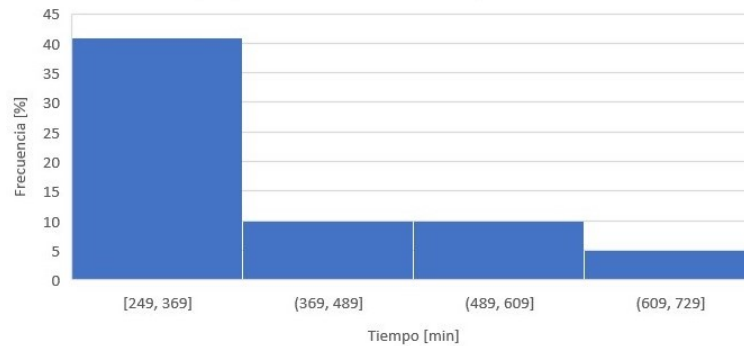


Figura 23: Histograma del momento de actualización del agendamiento.

Se hace un análisis de la disponibilidad de la flota obtenida de las mediciones de los tiempos de reparación de los equipos en las distintas réplicas. Se obtiene un promedio de 82.2%. Este valor es razonable y se ajusta a los datos usados para la incorporación de fallas y mantenimientos. La Figura 24 muestra un histograma de las disponibilidades en las réplicas.

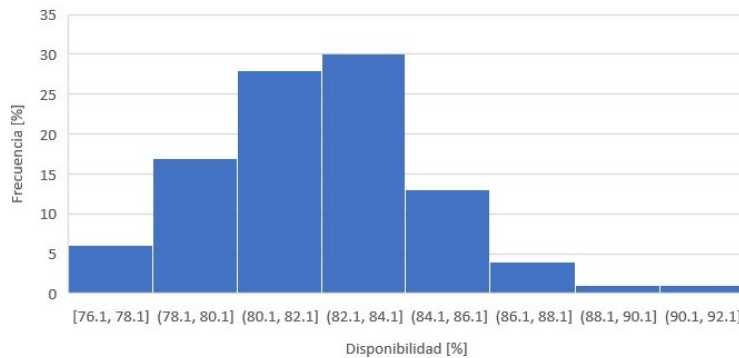


Figura 24: Histograma de disponibilidad en réplicas.

La Figura 25 presenta un histograma de la cantidad de reagendamientos requeridos al ejecutar distintas réplicas con esta alternativa. La mayor parte de las réplicas requieren un solo reagendamiento, en casos especiales de fallas sucesivas de equipos se ejecutan 2, 3 y hasta 4 de ellos.

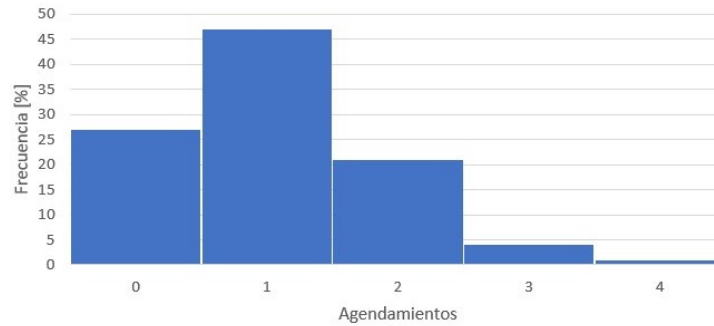


Figura 25: Histograma de reagendamientos requeridos.

## 6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta, busca evaluar los agendamientos de corto plazo a través de simulación. Para esto establece once pasos a seguir desde la concepción hasta la implementación. Esta metodología, en el caso de estudio es aplicada sobre agendamientos optimizados utilizando el enfoque JSSP propuesto por Álvarez y Morales (2021). El agendamento y por ende la metodología de simulación están establecidos para una mina de panel caving donde el desarrollo y preparación de ciertas zonas está a cargo de una empresa contratista especializada.

Para el caso de estudio, se obtiene una base de datos con 23 460 entradas con información de frente, equipo, tipo de actividad, tiempo de inicio, tiempo de fin, observaciones, entre otros. Un tratamiento inicial permite limpiar la base de datos, excluyendo 998 entradas por datos erróneos, incoherentes o que no se corresponden con tiempos de trabajo completos.

En el análisis de datos se modelan las distribuciones ajustadas a los parámetros de incertidumbre, tanto para los tiempos de trabajo como para las interrupciones. Estas funciones ajustadas, en su mayoría no rechazan la hipótesis de no ajuste en las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, sin embargo, son las que mejor se ajustan a la información disponible.

Se simula un caso base que considera las fallas en los equipos, además de la incertidumbre en los tiempos de pérdida operacional por cambio de turno. El caso base implica el cumplimiento estricto de la secuencia de tareas establecida por el agendamento inicial y alcanza un cumplimiento del 80.32 % lo cual muestra la robustez del agendamento.

Por medio de experimentos, se establece un valor de adherencia crítica de 0.85, de

forma que cuando existe una adherencia inferior, se ejecutan cambios sobre el plan de inicio. Con esto, se determina que un 69.5% de los casos requiere actualización del agendamiento, y además se evalúan dos estrategias de actualización del plan: asignación dinámica y reagendamiento JSSP.

En ambas estrategias de actualización del plan se obtienen mejores desempeños que el caso base. En el caso de la asignación dinámica se alcanza un cumplimiento del 89.74%, mientras que en el reagendamiento JSSP se obtiene 84.06% de cumplimiento. Estos valores resaltan por ser contrarios a lo esperado, tomando en cuenta resultados de agendamientos optimizados que son superiores a los casos reales (Álvarez y Morales, 2021).

Los resultados de las estrategias de actualización, se interpretan como consecuencia de mantener el criterio de baja adherencia para ejecutar reagendamientos posteriores al primero, en el caso de la actualización por reagendamiento. La estrategia de asignación dinámica, por el contrario, tras definir la necesidad de actualización, no precisa de una adherencia baja para ejecutar la asignación, dando continuidad a las actividades.

Aunque un cumplimiento superior al 80% puede considerarse aceptable, hay que notar que, en aplicaciones reales, se tomarán decisiones de cambios sobre los casos en que existan desviaciones del agendamiento. En estos casos tanto el cumplimiento como el desempeño de la flota van a ser superiores. Puede considerarse el 89.74% de la actualización mediante asignación dinámica, un cumplimiento representativo de estos casos, sin uso de herramientas de reagendamiento.

## **7. RECOMENDACIONES**

Con el enfoque de este trabajo situado sobre la metodología de evaluación de agendamientos, se hacen las siguientes recomendaciones:

Es recomendable contar con gran cantidad de información que permita un mejor modelado de los tiempos entre fallas y los tiempos de reparación con separación de equipos por familia.

Se recomienda profundizar en el estudio de la calidad de los agendamientos al variar los parámetros de entrada. Puede ser relevante mover tanto los tiempos de trabajo, como los tiempos de traslado y también los parámetros de los mecanismos internos de solución según corresponda a la metaheurística aplicada en cada caso.



Es necesario evaluar el valor de utilizar herramientas de reagendamiento optimizado para su uso en operaciones reales de desarrollo y preparación minera subterránea, mediante el uso de criterio experto acerca de la necesidad de la ejecución del algoritmo para reasignar equipos en frentes. Se recomienda documentar todos los datos concernientes a su uso como tiempos de comunicación, tiempos de cómputo, cantidad de usos por turno, medición del impacto del uso de la herramienta, etc.

# BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L., y Morales, N. (2021). Optimización de planificación de desarrollo y preparación de corto plazo en minería subterránea. *Journal of Mining Engineering and Research*, 2(2).
- Arisha, A., Young, P., y El Baradie, M. (2001). Job shop scheduling problem: an overview.
- Åstrand, M., Johansson, M., y Zanarini, A. (2018). Fleet scheduling in underground mines using constraint programming. En *International conference on the integration of constraint programming, artificial intelligence, and operations research* (pp. 605–613).
- AtlasCopco. (2007). *Mining methods in underground mining. second edition*.
- Aydiner, K., Celebi, N., y Pasamehmetoglu, A. (2006). A simulation model for mine production sequences.
- Babulak, E., y Wang, M. (2010). Discrete event simulation: State of the art. *Discrete Event Simulations. London: InTech*, 1–9.
- Baker, K. R., y Trietsch, D. (2013). *Principles of sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons.
- Banks, J. (2005). *Discrete event system simulation*. Pearson Education India.
- Barboza, M. (2019). *Metodología para la determinación de hundimiento en minas de panel caving bajo incertidumbre geológica* [Tesis de magíster, Universidad de Chile].
- Brox, D. (2013). Technical considerations for tbm tunneling for mining projects. *Transactions of the society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 334, 498–505.
- Bustamante, D., Constanzo, H., y Larraín, M. (2012). Mine planning at el teniente. *Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition of Mass Mining, Sudbury, ON*.
- Camhi, J. (2012). *Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving. caso estudio mina El Teniente Codelco Chile* [Tesis de magíster, Universidad de Chile].
- Campeau, L.-P., y Gamache, M. (2020). Short-term planning optimization model for underground mines. *Computers & Operations Research*, 115, 104642.
- CODELCO. (2005). *Norma ASARCO. documento interno*.
- Cortes, D., Martinez, Y., y Silva, M. (2018). Maximising resource utilisation in scheduling of underground mining works with multiple faces. En *Proceedings of the fourth international symposium on block and sublevel caving* (pp. 399–406).

- Fioroni, M. M., dos Santos, L. C. A., Franzese, L. A. G., Santana, I. R., Telles, G. D., Seixas, J. C., . . . de Alkmim, G. M. (2014). Logistic evaluation of an underground mine using simulation. En *Proceedings of the winter simulation conference 2014* (pp. 1855–1865).
- Giffler, B., y Thompson, G. L. (1960). Algorithms for solving production-scheduling problems. *Operations research*, 8(4), 487–503.
- Herazo, Y. Y. (2018). *Simulation and excavation of horizontal developments in block/panel caving mining* [Tesis de magíster, Universidad de Chile].
- Hou, J., Li, G., Wang, H., y Hu, N. (2020). Genetic algorithm to simultaneously optimize stope sequencing and equipment dispatching in underground short-term mine planning under time uncertainty. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(5), 307–325.
- Kumar, U., y Huang, Y. (1993). Reliability analysis of a mine production system—a case study. En *Annual reliability and maintainability symposium 1993 proceedings* (pp. 167–172).
- Kumar, U., Klefsjö, B., y Granholm, S. (1989). Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a swedish mine. *Reliability Engineering & System Safety*, 26(4), 341–361.
- Manríquez, F., Pérez, J., y Morales, N. (2020). A simulation–optimization framework for short-term underground mine production scheduling. *Optimization and Engineering*, 1–33.
- Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., y Arata, A. (2013). Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of mining science and Technology*, 23(1), 113–119.
- Morgan, W., y Peterson, L. (1968). Determining shovel-truck productivity. *Mining Engineering*, 20(12), 76–80.
- Musingwini, C. (2016). Optimization in underground mine planning—developments and opportunities. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(9), 809–820.
- Nehring, M., y Topal, E. (2007). Production schedule optimisation in underground hard rock mining using mixed integer programming. En *Project evaluation conference* (pp. 169–175).
- Nehring, M., Topal, E., Kizil, M., y Knights, P. (2012). Integrated short-and medium-term underground mine production scheduling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(5), 365–378.

- Paravarzar, S., Pourrahimian, Y., y Askari-Nasab, H. (2018). Short-term underground mine planning: A review. *Min Optim Lab*, 780(1), 305.
- Pourrahimian, Y., Askari-Nasab, H., y Tannant, D. (2012). Mixed–integer linear programming formulation for block–cave sequence optimisation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 4(1), 26–49.
- Rocher, W., Rubio, E., y Morales, N. (2011). Eight-dimensional planning: construction of an integrated model for the mine planning involving constructability. En *Proceedings 35th international symposium on application of computers in the minerals industry* (pp. 393–406).
- Rubio, E., Troncoso, S., y Prasetyo, R. (2008). Reliability center mine planning model for caving operations. En *Vth international conference & exhibition on mass mining massmin* (pp. 213–226).
- Schulze, M., Rieck, J., Seifi, C., y Zimmermann, J. (2016). Machine scheduling in underground mining: an application in the potash industry. *OR spectrum*, 38(2), 365–403.
- Sjödin, E. (2015). *Evaluation of mining automation with production simulation* [Master's Thesis, Luleå University of Technology].
- Song, Z., Rinne, M., y van Wageningen, A. (2013). A review of real-time optimization in underground mining production. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(12), 889–897.
- Song, Z., Schunnesson, H., Rinne, M., y Sturgul, J. (2015). Intelligent scheduling for underground mobile mining equipment. *PLoS one*, 10(6), e0131003.
- Sturgul, J. R., y Eharrison, J. (1987). Simulation models for surface mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1(3), 187–189.
- Terblanche, S., y Bley, A. (2015). An improved formulation of the underground mine scheduling optimisation problem when considering selective mining. *ORiON*, 31(1), 1–16.
- Torkamani, E., y Askari-Nasab, H. (2013). Truck-shovel operational planning using simulation in open pit mines. *MOL Annual Report Five 2012/2013 (ISBN: 978-1-55195-327-4)*, 123–136.
- Wang, H., Tenorio, V., Li, G., Hou, J., y Hu, N. (2020). Optimization of trackless equipment scheduling in underground mines using genetic algorithms. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(5), 1531–1544.

# ANEXOS

## Anexo A. Modelo computacional

### A.1. Datos de entrada

El código controla la simulación a partir de dos archivos de entrada. El primero es el plan para evaluar. Este plan contiene una lista de equipos y frentes asignados a cada uno de estos equipos. Cada ítem de la lista provee la información que se indica a continuación:

- Frente en el que realiza el trabajo.
- Si se trata de traslado (set) o trabajo (run).
- Tiempo de inicio de la actividad.
- Tiempo de fin de la actividad.

El segundo archivo que se requiere sirve para proveer información específica del entorno en el que se ejecuta la simulación. Este archivo contiene la siguiente información:

- Actividades:

Nombre de la actividad: Lista de actividades que comprenden el ciclo de minado.

Código: Acorde a los códigos entregados por el archivo del plan.

Tiempo: Función de distribución de la probabilidad que representa el tiempo que toma la actividad en completarse.

Equipos: Lista de equipos que pueden ejecutar dicha actividad.

- Equipos:

Nombre del equipo: Normalmente un número para distinguirlo.

Velocidad: Cada equipo tiene una velocidad de desplazamiento que sirve para determinar los tiempos de traslado. Se puede expresar como una función de distribución de probabilidad para incorporar incertidumbre respecto al tiempo que tarda un equipo en desplazarse.

Ubicación: Indica el lugar dónde el equipo se encuentra al inicio de la simulación.

Tiempo entre fallas: Función de distribución de la probabilidad asociada al tiempo entre fallas de los equipos (TBF).

Tiempo de reparación: Función de distribución de la probabilidad asociada al tiempo de reparación de los equipos (TTR).

- Frentes:

Nombre del frente: Normalmente un número que lo define.

Actividades pendientes: Lista de todas las actividades que son requeridas en ese frente.

Fracción requerida por actividad: Número que indica que porción de la actividad es requerida, por ejemplo, si el turno anterior ejecuto la mitad de la actividad, este valor es igual a 0.5.

- Distancias: Corresponde a una matriz de distancias entre cada una de las locaciones (incluyendo frentes, parking, taller, etc.). Esta matriz en conjunto con el dato de velocidad de cada equipo permite determinar el tiempo de desplazamiento entre locaciones.

## A.2. Lectura del plan

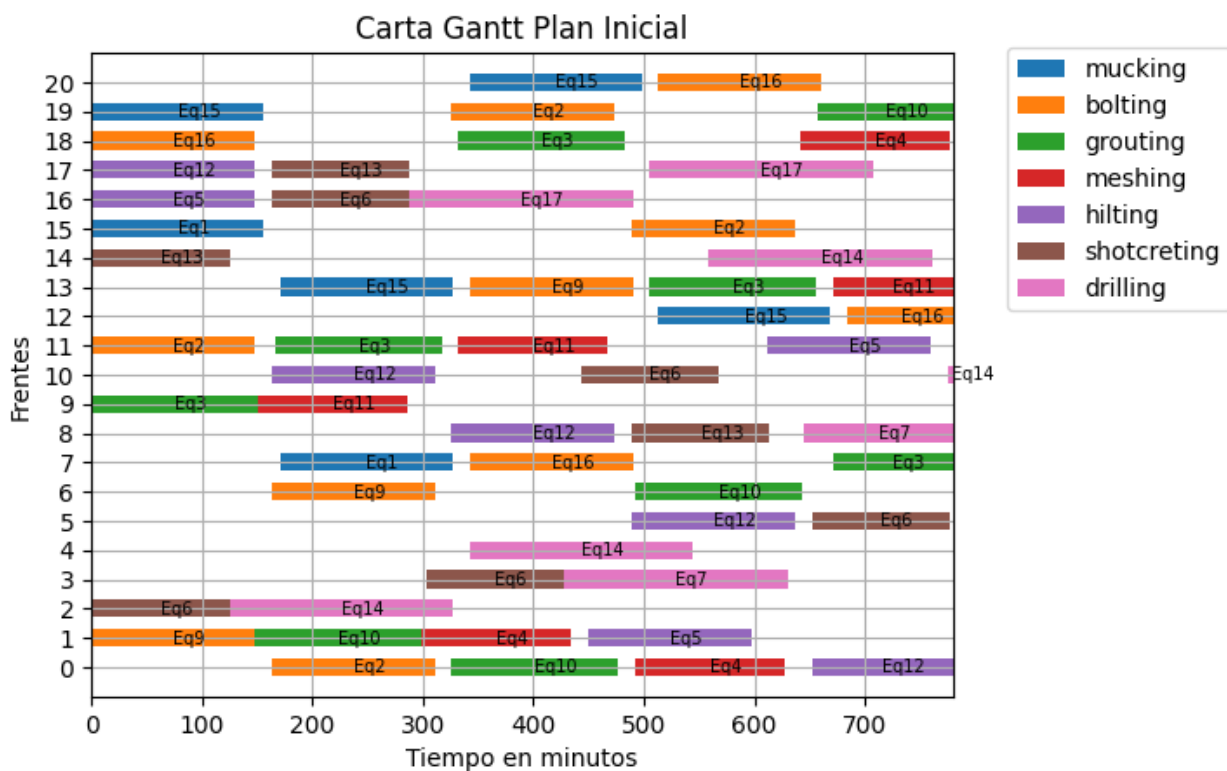


Figura A.1: Carta Gantt del plan inicial.

En primer lugar, se realiza la lectura del plan inicial, es decir, en principio se establece tanto la secuencia que deben seguir los elementos de la simulación (equipos/frentes), como los tiempos en los que se realizan. La figura A.1, muestra un ejemplo tomado de Álvarez y Morales (2021) en el que se tienen 17 equipos y 21 frentes. El ejemplo muestra

que el plan inicial con el supuesto de que los equipos se encuentran ubicados en los frentes en los que deben realizar su primer trabajo, tanto si es al principio de la simulación como si es después de que otro equipo ya ha ejecutado una actividad en ese mismo frente.

### A.3. Asignación acorde al plan

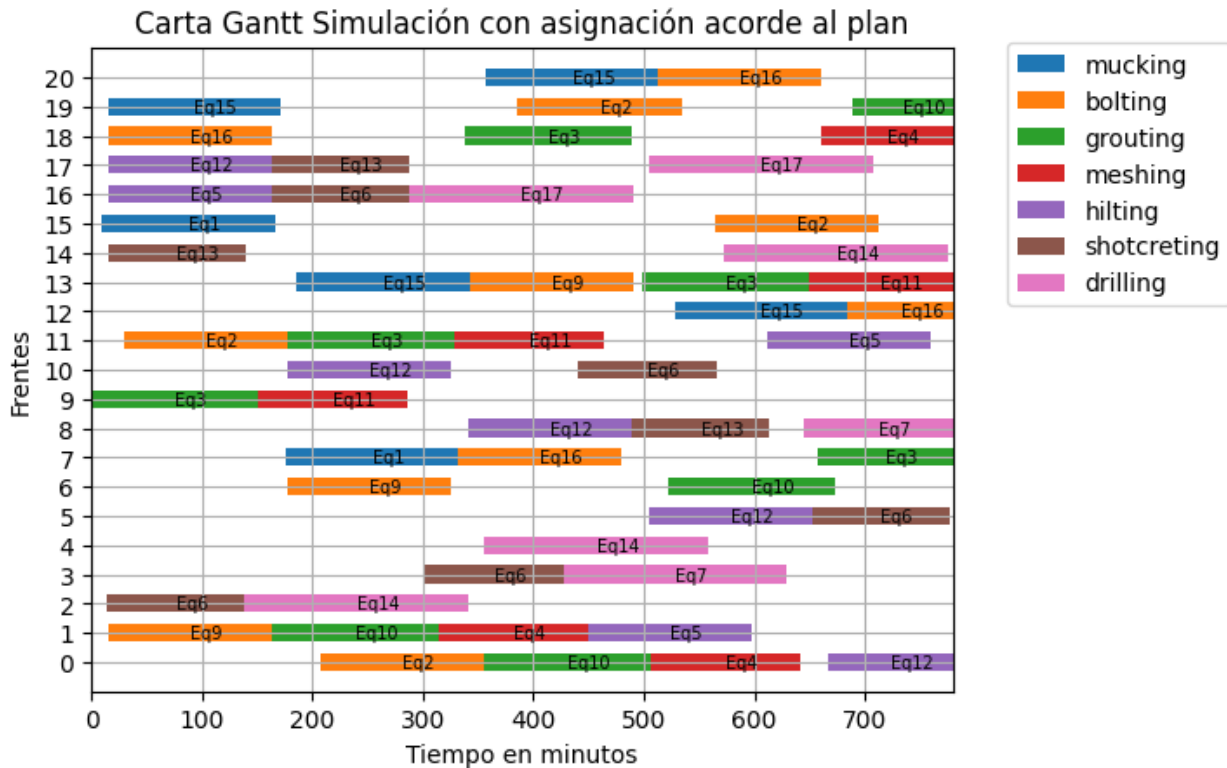


Figura A.2: Carta Gantt de la asignación acorde al plan.

La asignación acorde al plan se ha implementado bajo la regla de que cada equipo está obligado a seguir una secuencia específica de frentes, y un equipo no se traslada al frente siguiente a menos que haya completado su tarea en el frente actual. Esto resulta en desviaciones respecto al plan inicial en cuanto a los tiempos se refiere, pero no cambia nada respecto a la secuencia dada en la asignación de los equipos que ejecutan actividades en los frentes. La primera desviación se produce en el primer traslado puesto que la simulación toma en cuenta la posición inicial del equipo, entonces añade un tiempo de traslado cuando es el caso. La Figura A.2 muestra este efecto. Tomando como referencia el mismo ejemplo que en la sección anterior, se ha ejecutado la simulación teniendo en cuenta que todos los equipos se encuentran en parking excepto el equipo 3, que, para graficar este punto, está posicionado en el frente 9 que es el primero asignado a este equipo según el plan, por tanto, no se ve el primer tiempo de traslado.

El ejemplo muestra únicamente la asignación indicada sin incluir interrupciones ni tiempos variables acorde a una distribución de probabilidad.

## A.4. Asignación dinámica

La asignación dinámica se implementa relacionando todos los equipos libres con los frentes libres. Los equipos son asignados a un frente que lo requiera, o puestos en espera según el algoritmo indicado en la Figura 8. Si existen varios equipos disponibles para un frente, se asigna aquel cuya ubicación sea menos distante hasta el frente. La Figura A.3 es una aplicación de la asignación dinámica al ejemplo del plan mostrado en la figura A.1.

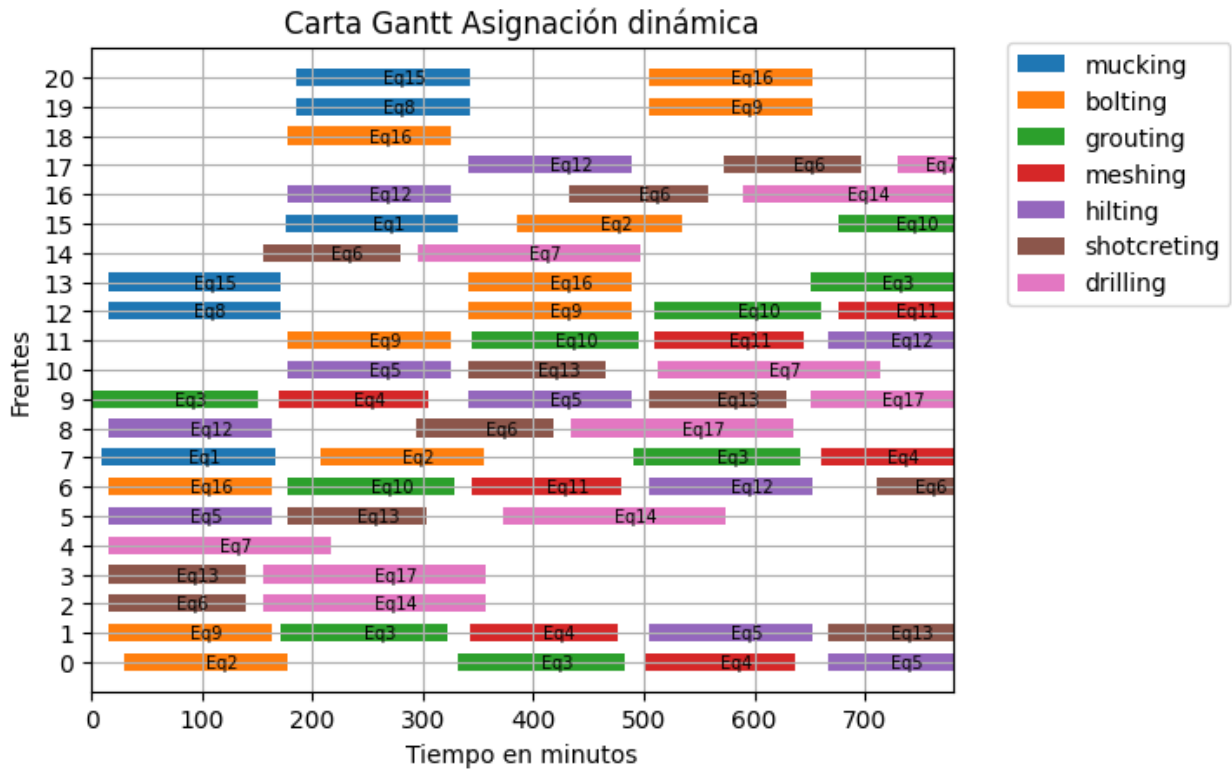


Figura A.3: Carta Gantt de la asignación dinámica.



# Anexo B. Funciones de distribución de probabilidad

## B.1. Tiempos de trabajo por actividades

### Regado de marina

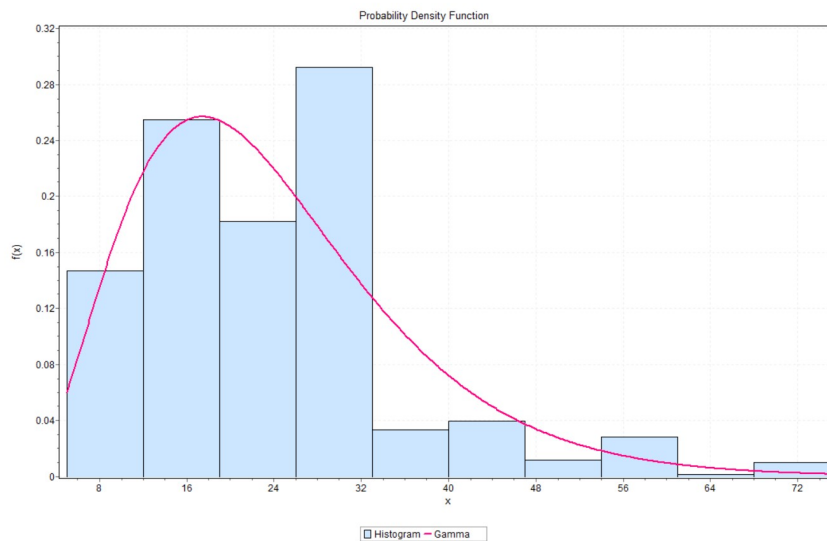


Figura B.1: Regado de marina - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=3.7252$ , $\beta=6.3853$	No

## Extracción de marina a acopio temporal

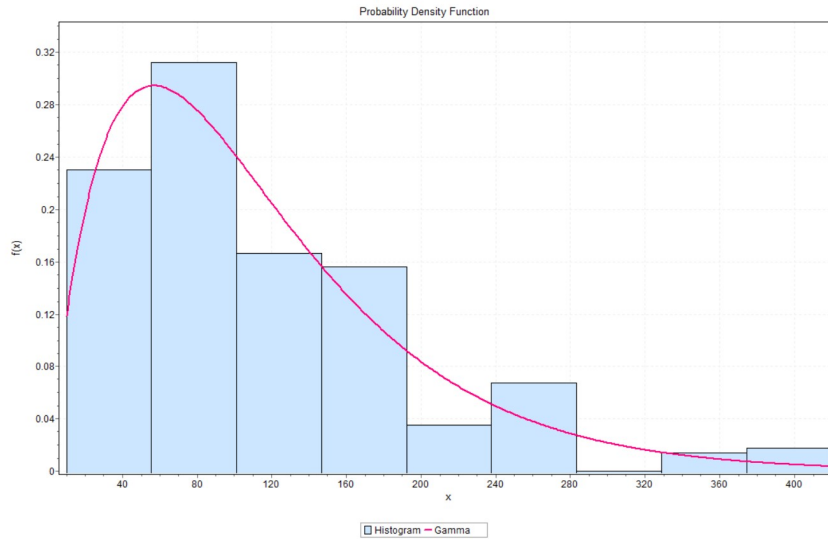


Figura B.2: Extracción de marina a acopio temporal - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=1.9954$ , $\beta=57.019$	Sí

## Extracción de marina a punto de vaciado

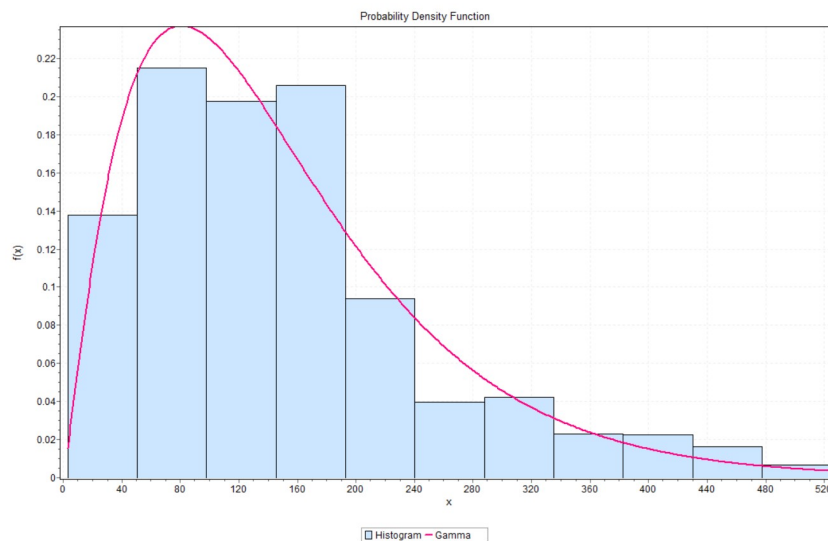


Figura B.3: Extracción de marina a punto de vaciado - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=2.1751$ , $\beta=68.681$	No

## Acuñadura manual

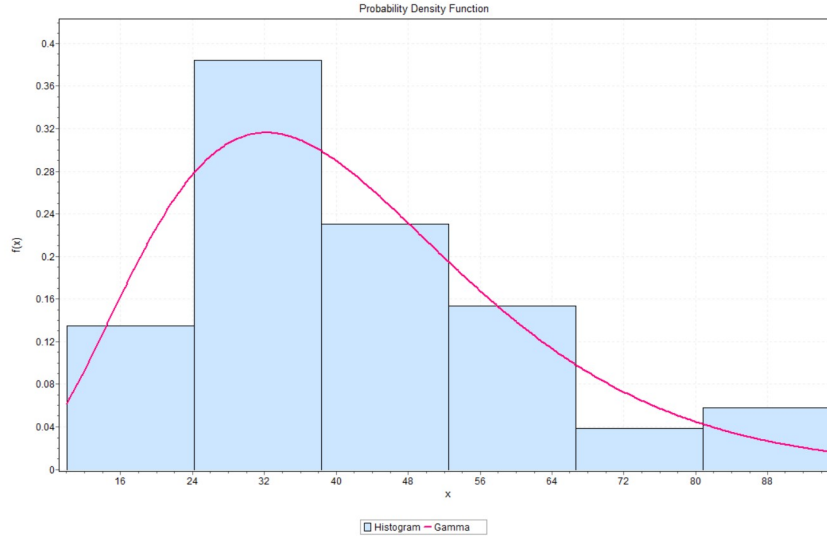


Figura B.4: Acuñadura manual - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=4.4013$ , $\beta=9.4595$	Sí

## Acuñadura mecanizada

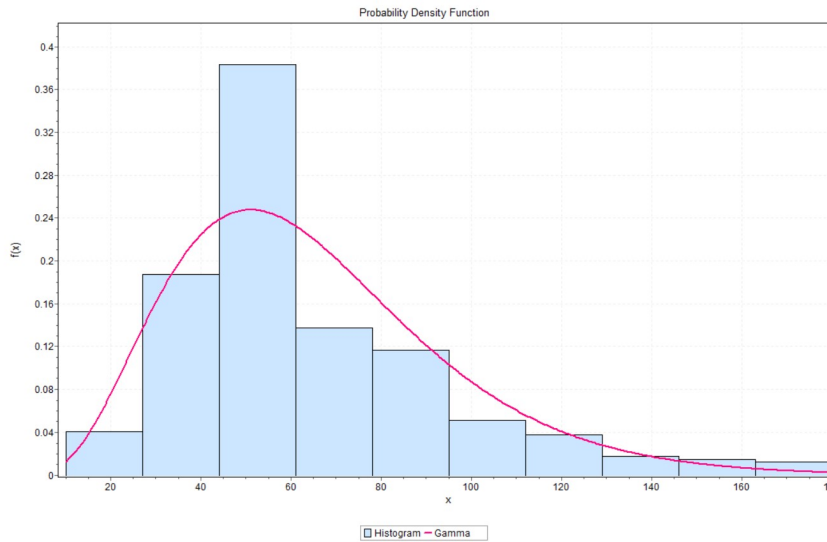


Figura B.5: Acuñadura mecanizada - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=4.6205$ , $\beta=14.065$	No

## Perforación de pernos helicoidales

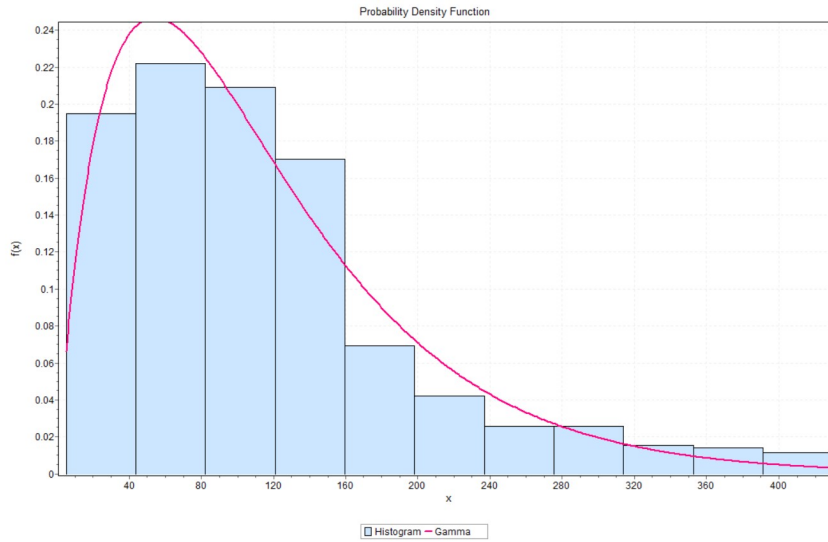


Figura B.6: Perforación de pernos helicoidales - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=1.8929$ , $\beta=60.432$	No

## Perforación y colocación de split set

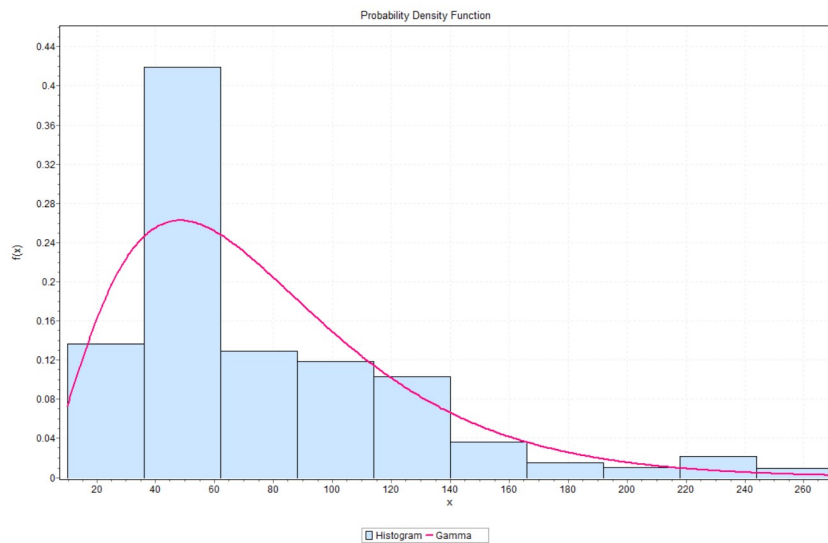


Figura B.7: Perforación y colocación de split set - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=2.6456$ , $\beta=29.303$	No

## Instalación y lechado de pernos helicoidales

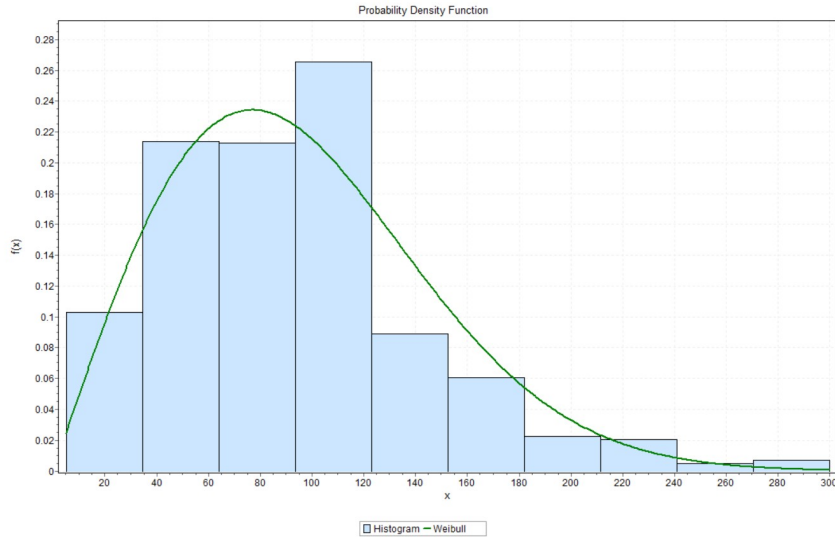


Figura B.8: Instalación y lechado de pernos helicoidales - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Weibull	$\alpha=2.0086$ , $\beta=108.32$	No

## Fortificación mecanizada

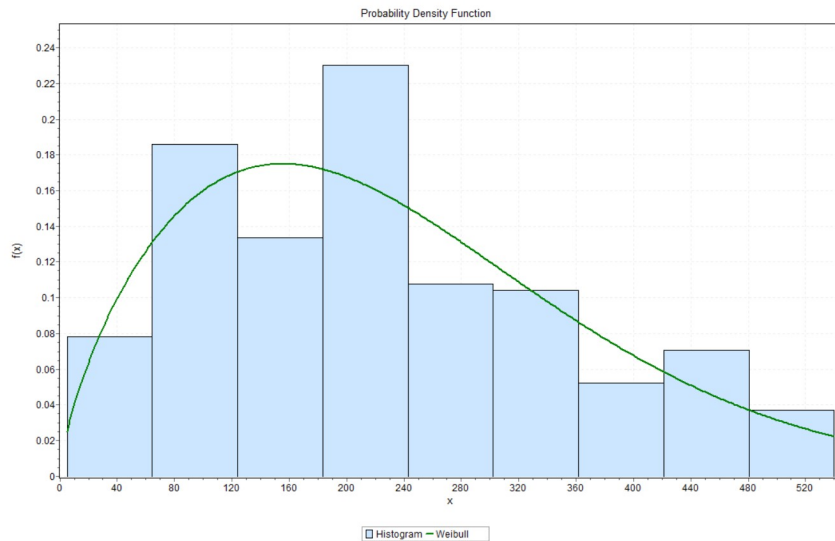


Figura B.9: Fortificación mecanizada - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Weibull	$\alpha=1.6863$ , $\beta=264.52$	Sí

## Instalación de malla

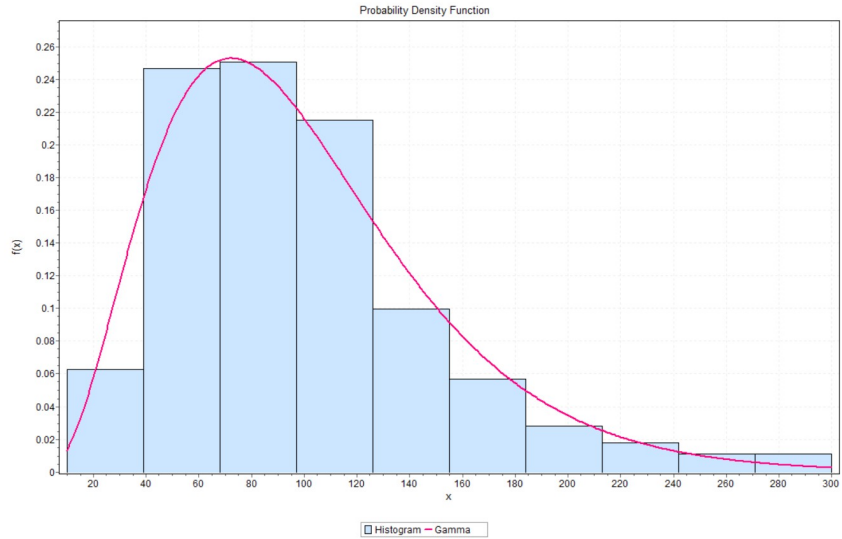


Figura B.10: Instalación de malla - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=3.6524$ , $\beta=27.213$	No

## Instalación de malla velo

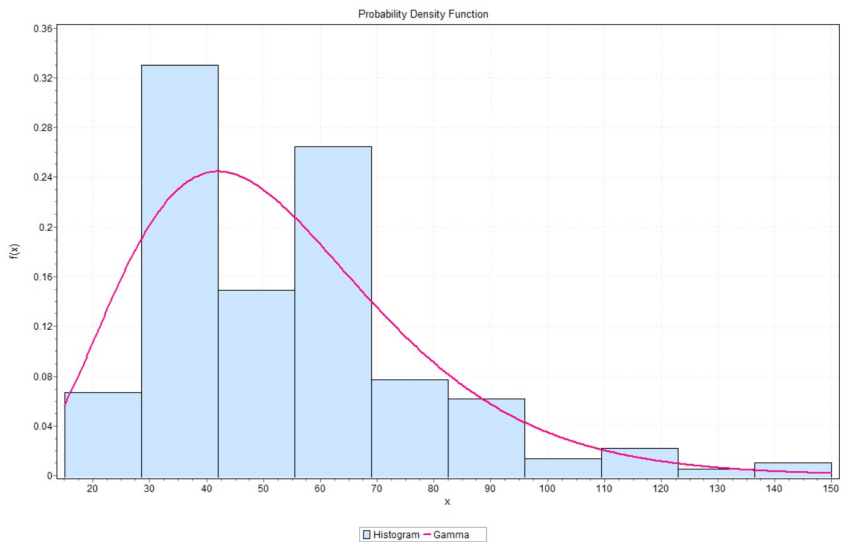


Figura B.11: Instalación de malla velo - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=4.7967$ , $\beta=11.058$	No

## Hilteo de malla

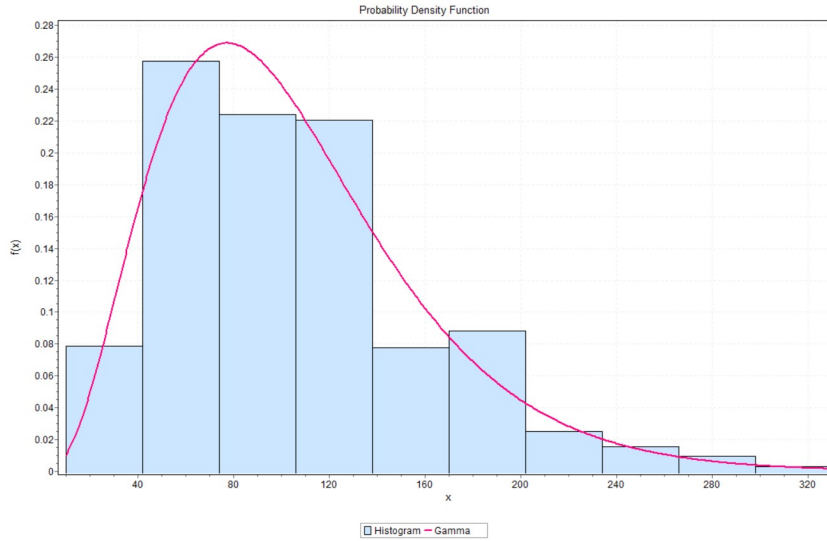


Figura B.12: Hilteo de malla - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=3.8024$ , $\beta=27.531$	No

## Proyección de shotcrete

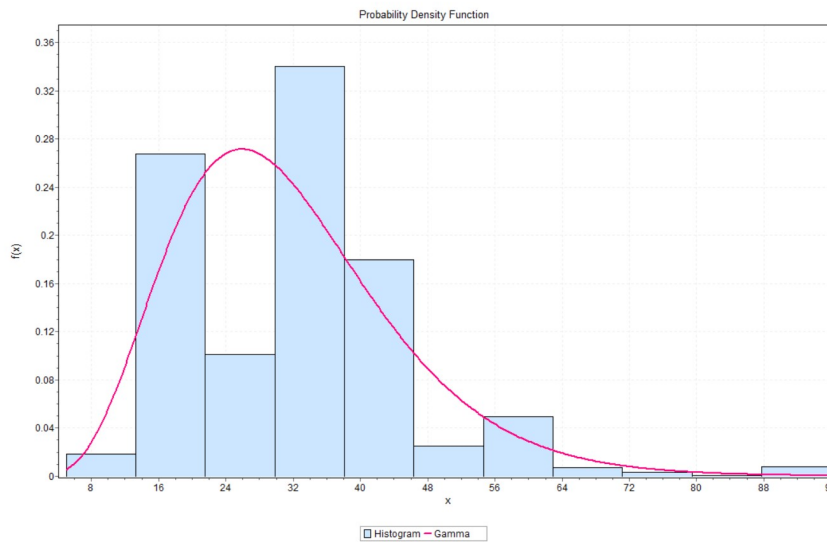


Figura B.13: Proyección de shotcrete - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=5.6995$ , $\beta=5.5092$	No

## Topografía - Escáner fotografía marcación

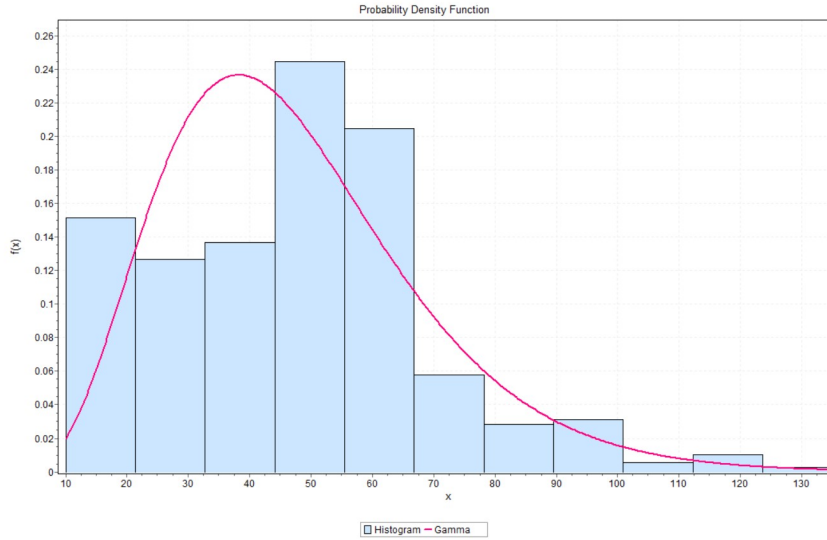


Figura B.14: Topografía - Escáner fotografía marcación - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=5.1369$ , $\beta=9.2303$	No

## Topografía - Otros

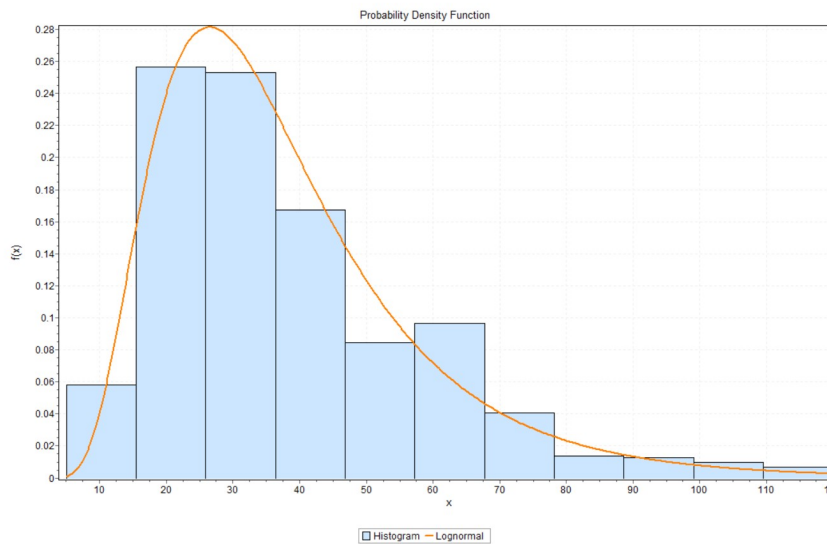


Figura B.15: Topografía - Otros - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Lognormal	$\sigma=0.49559$ , $\mu=3.521$	No



## Limpeza de pata

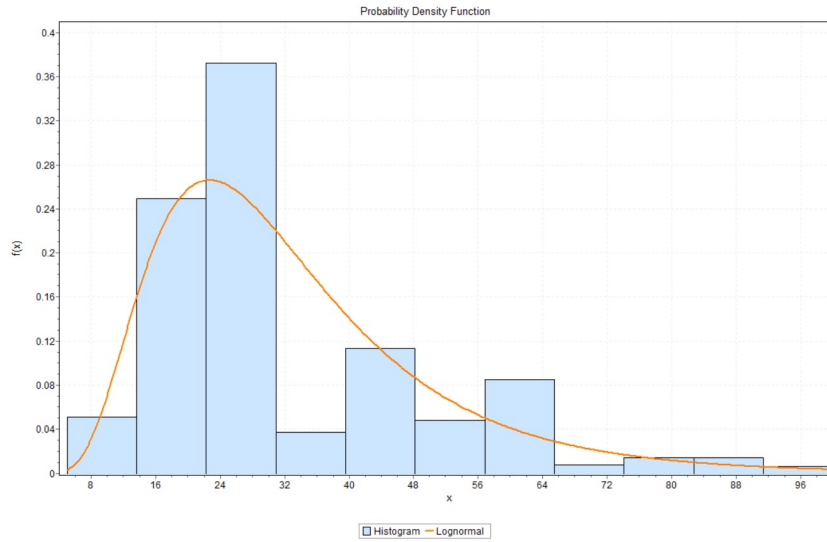


Figura B.16: Limpeza de pata - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Lognormal	$\sigma=0.50306$ , $\mu=3.3745$	No

## Perforación de desquinche

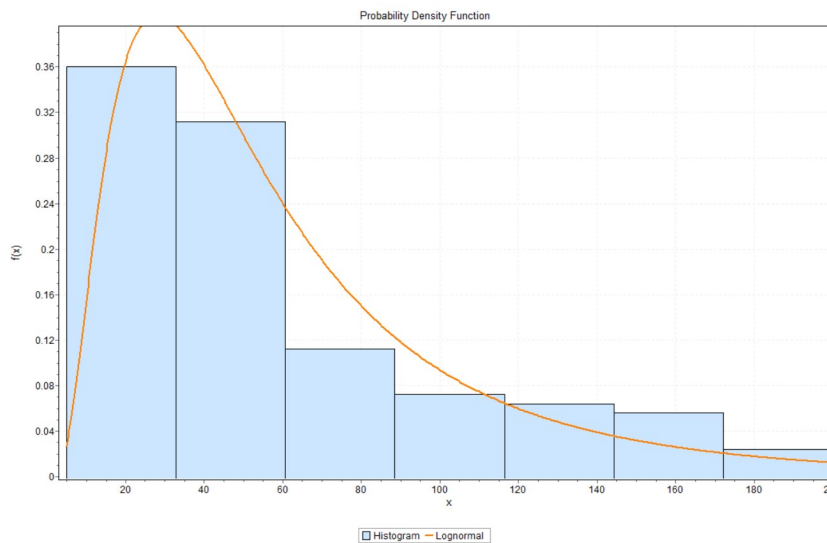


Figura B.17: Perforación de desquinche - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Lognormal	$\sigma=0.74034$ , $\mu=3.8865$	Sí

## Perforación de frente

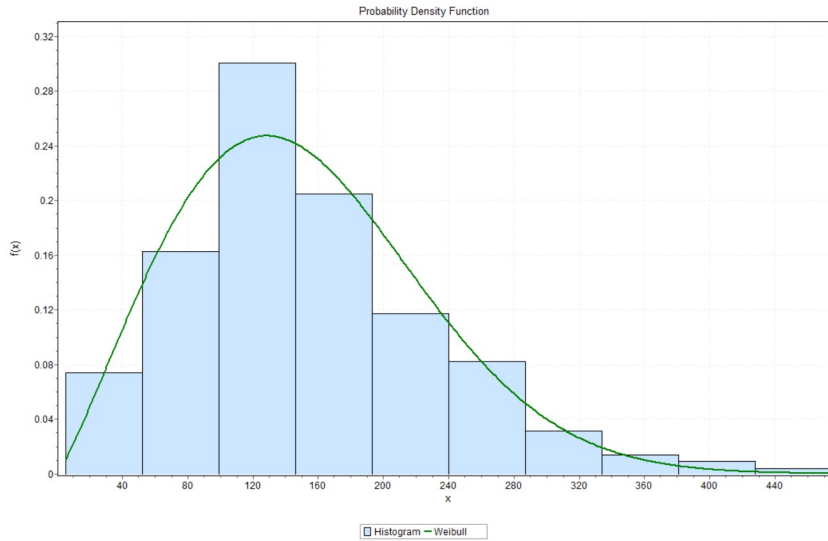


Figura B.18: Perforación de frente - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Weibull	$\alpha=2.1523$ , $\beta=171.43$	No

## Carguío de frente

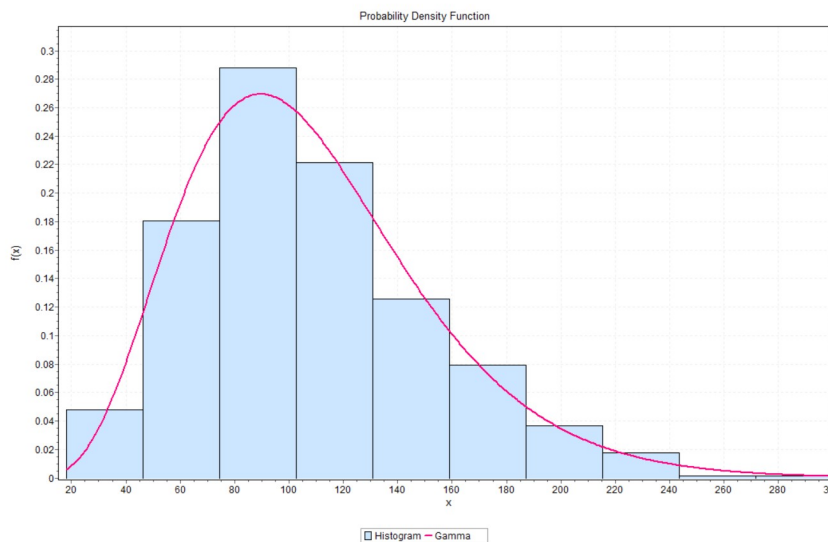


Figura B.19: Carguío de frente - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Gamma	$\alpha=5.7666$ , $\beta=18.784$	No

# Tronadura de avance

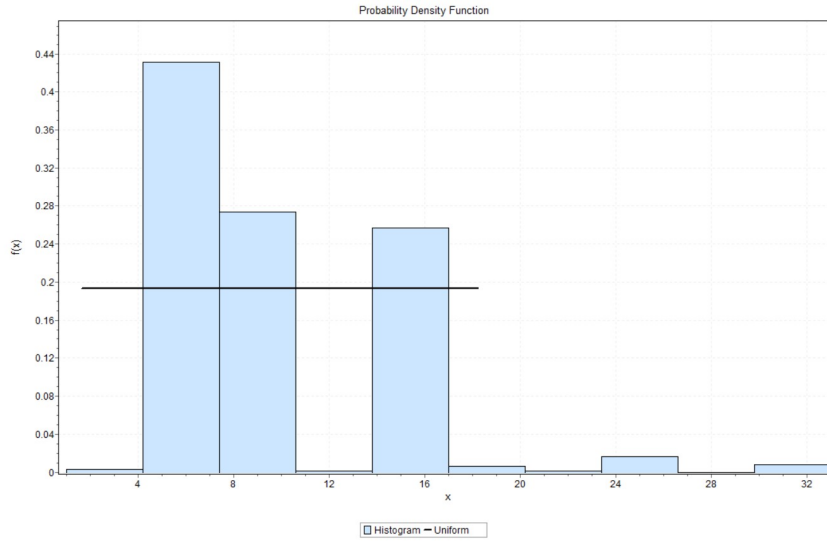


Figura B.20: Tronadura de avance - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Uniforme	a=1.6379 , b=18.217	No

## B.2. Pérdida operacional por cambio de turno

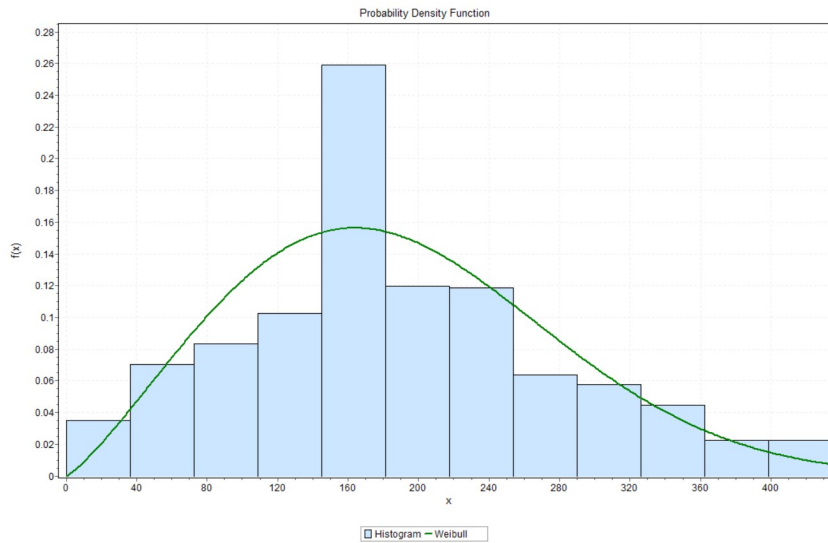


Figura B.21: Pérdida operacional por cambio de turno - Función ajustada.

Distribución	Parámetros	Prueba Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ )
Weibull	$\alpha=2.225$ , $\beta=214.17$	No