



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**MODELO DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL DE UN SISTEMA
EXPLOTADO POR MÉTODO BLOCK CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

SEBASTIÁN OSVALDO ARMIJO MUÑOZ

**PROFESOR GUÍA:
MANUEL REYES JARA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VÍCTOR ENCINA MONTENEGRO
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN

Uno de los métodos de explotación que permite la extracción de yacimientos minerales con cuerpos de grandes dimensiones es el método de Block Caving. En dicho método existen diferentes operaciones unitarias, que van desde que se extrae el mineral de la mina hasta que llega a su procesamiento metalúrgico.

A partir de la confiabilidad y disponibilidad de los componentes del sistema de manejo de minerales, se puede evaluar la certeza del cumplimiento del plan de producción. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es determinar la confiabilidad operacional del proceso de manejo de minerales al interior mina, a partir de un modelo de simulación integrado. Para ello se realizaron simulaciones de distintos escenarios con la variación de parámetros operacionales, obteniéndose la disponibilidad teórica del sistema y el impacto de las labores de mantención en el uso de equipos y recursos.

Se tomó como referencia el sistema diseñado para Chuquicamata Subterránea, en particular, el macrobloque N5-1 ubicado en la cota 1841, para el cual se asociaron distintas interferencias operaciones y modos de falla a cada componente. El modelo consta de puntos de extracción, subcalles de producción, parrillas de reducción, piques de traspaso, tolvas de almacenamiento, alimentadores, chancadores y una correa transportadora.

Para la simulación se utilizó el software *Availability Workbench*®, en su módulo AvSim, en el cual se consideraron 1.000 réplicas para un tiempo de 7.200 horas. Se evaluaron un total de 18 escenarios posibles, en los cuales se varió el criterio de ingreso de cuadrilla para la reparación de puntos de extracción, la implementación de mantenciones programadas e inspecciones preventivas y la cantidad de equipos y recursos disponibles para la realización de las labores de reparación y mantención.

De los resultados obtenidos, se destaca que el criterio de ingreso de reparación de puntos fue el factor más determinante en la disponibilidad del sistema, mientras que la variación del stock de equipos y recursos y las mantenciones programadas no provocaron un impacto significativo en ésta. El criterio medio de ingreso fue el que entregó la disponibilidad más alta (del orden del 80%) y los componentes más influyentes fueron los puntos de extracción y la correa transportadora. Al comparar la producción planificada con la producción según el modelo de confiabilidad, se tiene resultados similares que fluctúan entre 6,8 a 7 millones de toneladas.

Como conclusiones del trabajo realizado se tiene que es de suma importancia elaborar una estrategia que permita la reparación de puntos sin la necesidad de paralizar todo el funcionamiento de las calles, buscar una alternativa de transporte del mineral cuando la correa se encuentre fuera de servicio y, para evitar el deterioro anticipado de los equipos e infraestructuras, es necesario la implementación de una estrategia de mantenciones programadas que además permita optimizar los tiempos productivos y los tiempos detenidos.

ABSTRACT

Block Caving method allows the extraction of mineral deposits with large bodies. This method includes different unit operations, starting from ore extracted and ending with a metallurgical processing.

Due to certainty of production plan fulfillment can be evaluated through reliability and availability handling minerals system components, inside mine operational reliability was determined by an integrated simulation model as main objective. For that, simulations of different scenarios were made varying operational parameters. System theoretical availability was determined and maintenance labors, equipment use and resources were evaluated.

Chuquicamata Subterranea mine designed system was the reference, especially macroblock N5-1 located 1841 meters above sea level, with different operational interferences and failure modes, for each component, were associated in the system. This implemented system includes draw points, production sub-drifts, reducing grills, ore passes, storage hoppers, feeders, crushers and conveyor belt.

AvSim module of *Availability Workbench*® software was used to simulation, considering 1000 aftershocks in 7200 hours. Also, 18 scenarios were evaluated, varying entry criterion for draw points repair, implementation of scheduled maintenance and preventive inspections, and the amount of equipment and resources to perform repair work and maintenance.

Results indicate the entry criterion repair points was the most influential factor in availability. In other hand, stock change of equipment and resources and scheduled maintenance do not cause any significant impact on. Medium criterion to repair draw points gave the highest availability (around 80%). Finally, the most influential components were the draw points and the conveyor belt. Comparing schedule production with reliability model production, results were 6.8-7 million tons.

As conclusions, it is necessary to create a strategy for draw points repair without paralyzing all streets operation. Also, find an alternative mineral transportation when conveyor belt is out of order. Finally, implementation of a schedule maintenance strategy to avoid early delay of equipment and infrastructure, beside of optimizes productive times and stopped times.

AGRADECIMIENTOS

Luego de este largo camino, estaré eternamente agradecido por lo que han hecho por mí a las grandes personas que me dieron la vida, a mis padres. Sin su amor, apoyo, entrega y dedicación no hubiese podido alcanzar el objetivo. Luis y Teresa, gracias por todo, conmigo ya terminan el largo desafío de darle educación a sus hijos, es hora de que descansen y se disfruten mutuamente. Siempre recordaré la frase que siempre me decían “la educación es lo único que uno puede dejarles a los hijos” y con su ejemplo se que dejaron todo para formarnos a mí y a mis hermanos. Como no, agradecerles a ellos también, ustedes fueron mi ejemplo, José y Marcia, de cumplir nuestras metas y alcanzar nuestros objetivos, ahora cada uno tiene su familia, sus lindas familias en donde mis 4 sobrinas Rocío, Paz, Sofía y Josefa y mi sobrinito Bastián, me hacen un tío “chocho”, sigan el ejemplo de sus Tatitas y Papás.

Como no mencionar en este espacio a mis amigos de toda la vida, “Los Vende Humo”, con algunos ya son 20 años de amistad, con otros un poco menos y con cada uno tengo una amistad especial y única, y gracias por estar siempre en las buenas y en las malas.

Gracias también a aquel equipo en la U que me dio tantas alegrías, gracias Los Refinos por las 4 copas logradas entre Mineiraos y Bundesminas, y sé que más allá del equipo que somos, tenemos una gran amistad, espero que con el paso de los años y con las vueltas que da la vida nos volvamos a encontrar una y mil veces haciendo rodar la pelotita como nos gusta.

Se que hay personas que son demasiado importantes para mí y que quizás no estoy nombrando, a ellas les digo que gracias por cada granito de arena que han aportado en mi vida, y que gracias a ese granito me hacen cada día ser una mejor persona, y además que a pesar de lo mañoso, enojón y gruñón que soy, han sabido quererme, valorarme y hasta aguantarme.

Quiero agradecer también al Instituto Chacabuco y la Universidad de Chile, en dónde además de recibir una buena enseñanza también conocí al mundo que me rodea día a día y a las grandes amistades que he formado en ambos lugares.

Finalmente, quiero darle las gracias a Hatch, empresa donde realicé mi memoria, por haberme facilitado todos los recursos que fueron necesarios para concluir mi trabajo.

Gracias, es una palabra que queda chica para expresar lo feliz y agradecido que estoy de todos ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances	3
1.4. Metodología	4
2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	5
2.1. Estado del arte.....	5
2.2. Origen de la teoría de confiabilidad.....	6
2.2.1. Confiabilidad	8
2.2.2. Disponibilidad	11
2.2.3. Mantenibilidad.....	11
2.2.4. Diagramas de bloques de confiabilidad.....	12
2.2.5. Análisis de CDM	14
2.3. Simulación	14
2.3.1. Definición	14
2.3.2. Ventajas y desventajas.....	15
2.3.3. Etapas del proceso de simulación.....	16
2.3.4. Tipos de modelos de simulación	16
2.3.5. Método de Montecarlo.....	17
2.4. Distribuciones de probabilidades.....	18
2.4.1. Distribución exponencial.....	19

2.4.2.	Distribución de Weibull con 1 parámetro	19
2.4.3.	Distribución de Weibull con 2 parámetros	20
2.4.4.	Distribución de Weibull con 3 parámetros	20
2.4.5.	Bi-Weibull	20
2.4.6.	Tri-Weibull	20
2.4.7.	Distribución lognormal.....	21
2.4.8.	Distribución normal.....	21
3.	DESCRIPCIÓN SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES.....	22
3.1.1.	Macrobloques	23
3.1.2.	Nivel de Producción	25
3.1.3.	Traspaso-Chancado	27
4.	MODELO DE CONFIABILIDAD.....	28
4.1.	Descripción del software	28
4.2.	Construcción del modelo	29
4.2.1.	Identificación de interferencias operacionales	29
4.2.2.	Recursos y trabajos a realizar	31
4.2.3.	Inputs del modelo	33
4.2.4.	Criterios generales de la simulación.....	35
4.3.	Calibración y verificación del modelo.....	37
4.3.1.	Puntos de extracción.....	37
4.3.2.	Subcalles de producción	39
4.3.3.	Parrillas de reducción	40
4.3.4.	Piques de traspaso.....	40
4.3.5.	Tolvas de almacenamiento	42

4.3.6.	Alimentadores.....	42
4.3.7.	Chancadores.....	43
4.3.8.	Correa	44
5.	RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	45
5.1.	Resultados por criterio de ingreso de reparación.....	45
5.2.	Resultados por cantidad de equipos y recursos disponibles	50
5.3.	Resultados por uso de mantención e inspección preventiva.....	51
5.4.	Uso de equipos y recursos	53
5.5.	Producción	54
5.5.1.	Producción planificada	54
5.5.2.	Producción según modelo de confiabilidad.....	56
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
6.1.	Conclusiones	60
6.2.	Recomendaciones	61
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	62
8.	ANEXOS.....	65
8.1.	Detalle de requerimientos de equipos y recursos.....	66
8.2.	Distribuciones de fallas.....	68
8.3.	Resultados	71
8.4.	Detalle de tiempos y cantidades de interferencias y reparaciones.....	77
8.5.	Usos de equipos y recursos	81
8.6.	Secuencia de extracción y plan de producción	82
8.7.	Detalle de toneladas, disponibilidad, y productividad	85
8.8.	Resultados mostrados por AvSim.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de un sistema minero tradicional.	7
Figura 2: Ciclo de confiabilidad.	8
Figura 3: Representación "Curva de la Bañera".	10
Figura 4: Configuraciones de los 4 sistemas múltiples.	14
Figura 5: Esquema de las etapas del proceso de simulación.	16
Figura 6: Diagrama conceptual del sistema de manejo de minerales.	22
Figura 7: Modelo de bloques del nivel de producción.	26
Figura 8: Modelo de bloques del nivel traspaso-chancado.	27
Figura 9: Lógica en el software para los puntos de extracción.	38
Figura 10: Lógica en el software para las subcalles.	39
Figura 11: Lógica en el software para las parrillas.	40
Figura 12: Lógica en el software para los piques.	41
Figura 13: Lógica en el software para las tolvas.	42
Figura 14: Lógica en el software para los alimentadores.	42
Figura 15: Lógica en el software para los chancadores.	43
Figura 16: Lógica en el software para la correa.	44

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Disponibilidad según escenarios (criterio dominante: ingreso de cuadrilla).	45
Gráfico 2: Tiempo y número de interferencias para los PE.	47
Gráfico 3: Tiempo y número de reparaciones para los PE.	48
Gráfico 4: Tiempo y número de interferencias para la correa.	49
Gráfico 5: Tiempo y número de reparaciones para la correa.	49
Gráfico 6: Costos versus disponibilidad.	50
Gráfico 7: Disponibilidad para PE1.	51
Gráfico 8: Disponibilidad para PE2.	52
Gráfico 9: Disponibilidad para PE3.	52
Gráfico 10: Uso de equipos y recursos según criterio de ingreso.	53
Gráfico 11: Uso porcentual de equipos y recursos.	54
Gráfico 12: Plan de producción macrobloque N5-1.	55
Gráfico 13: Plan de producción en régimen para las 4 calles del macrobloque N5-1.	56
Gráfico 14: Disponibilidad versus Producción.	59
Gráfico 15: Distribución falla de punto de extracción por colgadura (1.1).	68
Gráfico 16: Distribución falla de punto de extracción por sobretamaño (1.2).	68
Gráfico 17: Distribución falla de LHD (2.1).	68
Gráfico 18: Distribución falla de carpeta (2.2).	68
Gráfico 19: Distribución falla de estocadas (2.3).	68
Gráfico 20: Distribución falla inesperada calle (2.4).	68
Gráfico 21: Distribución falla por bolones en parrilla (3.1).	68
Gráfico 22: Distribución falla de infraestructura parrilla (3.2).	68
Gráfico 23: Distribución falla de piques por colgadura (4.1).	69

Gráfico 24: Distribución fallas mecánicas de pique (4.2).	69
Gráfico 25: Distribución fallas de pique por capacidad (4.3).....	69
Gráfico 26: Distribución fallas inesperadas en pique (4.4).	69
Gráfico 27: Distribución falla por desgaste de tolva (5.1).	69
Gráfico 28: Distribución falla infraestructura de tolva (5.2).....	69
Gráfico 29: Distribución falla de tolva por capacidad (5.3).	69
Gráfico 30: Distribución falla de alimentador por falta de energía (6.1).	69
Gráfico 31: Distribución falla de componentes de alimentador (6.2).	70
Gráfico 32: Distribución falla inesperada de alimentador (6.3).	70
Gráfico 33: Distribución falla de chancador por capacidad (7.1).....	70
Gráfico 34: Distribución falla de chancador por falta de energía (7.2).....	70
Gráfico 35: Distribución falla de chancador por presencia de atollos (7.3).....	70
Gráfico 36: Distribución fallas chancador por otras razones (7.4).....	70
Gráfico 37: Distribución falla de correa por capacidad (8.1).	70
Gráfico 38: Distribución falla de correa por falta de energía (8.2).	70
Gráfico 39: Distribución falla de los componentes de la correa (8.3).....	71
Gráfico 40: Distribución falla por rotura de correa (8.4).	71
Gráfico 41: Plan de producción PMCHS.	84
Gráfico 42: Disponibilidad de componentes.	86
Gráfico 43: Confiabilidad de componentes.	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Visualización general de la mina con sus niveles.	23
Ilustración 2: Esquema del desarrollo de un macrobloque.	23
Ilustración 3: Distribución de los macrobloques de explotación.	24
Ilustración 4: Esquema isométrico de los niveles de los macrobloques.	25
Ilustración 5: Distribución en perfil de las obras del nivel de explotación.	25
Ilustración 6: Definición de subcalle.	26
Ilustración 7: Esquema isométrico del nivel de producción.	26
Ilustración 8: Esquema isométrico del nivel de traspaso-chancado.	27
Ilustración 9: Secuencia de extracción MB N5-1.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la simulación.	15
Tabla 2: Modelos de simulación.....	17
Tabla 3: Parámetros de la distribución exponencial.....	19
Tabla 4: Datos de la distribución de Weibull (1 parámetro).	19
Tabla 5: Datos de la distribución de Weibull (3 parámetros).....	20
Tabla 6: Datos de la distribución lognormal.	21
Tabla 7: Eventos principales en el nivel de producción.	29
Tabla 8: Eventos principales en el nivel de traspaso.....	30
Tabla 9: Eventos principales en el chancado y descarga.....	30
Tabla 10: Consecuencias y labores para el nivel de producción.	31
Tabla 11: Consecuencias y labores para el nivel de traspaso-chancado.....	31
Tabla 12: Recursos utilizados en las labores de mantención y sus costos.	32
Tabla 13: Distribuciones de frecuencia de fallas.....	33
Tabla 14: Distribuciones de los tiempos de reparaciones.....	34
Tabla 15: Detalle de frecuencias y duraciones de mantenciones e inspecciones.	35
Tabla 16: Detalles del stock de equipos y recursos para cada escenario.....	37
Tabla 17: Promedio de disponibilidades de componentes por criterio de ingreso.	46
Tabla 18: Porcentaje y tonelaje anual de las partes según el modelo de confiabilidad.....	57
Tabla 19: Parámetros generales.....	57
Tabla 20: Parámetros de los LHD.	57
Tabla 21: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE1.....	58
Tabla 22: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE2.....	58
Tabla 23: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE3.....	58

Tabla 24: Detalle nomenclatura escenarios.....	65
Tabla 25: Requerimientos de equipos y recursos para las reparaciones y mantenencias.	66
Tabla 26: Requerimiento de equipos y recursos para las inspecciones.....	67
Tabla 27: Resultados PE1 - ER1 - CMI	71
Tabla 28: Resultados PE1 - ER1 - SMI.....	71
Tabla 29: Resultados PE1 - ER2 - CMI.	72
Tabla 30: Resultados PE1 - ER2 - SMI.....	72
Tabla 31: Resultados PE1 - ER3 - CMI.	72
Tabla 32: Resultados PE1 - ER3 - SMI.....	73
Tabla 33: Resultados PE2 - ER1 - CMI.	73
Tabla 34: Resultados PE2 - ER1 - SMI.....	73
Tabla 35: Resultados PE2 - ER2 - CMI.	74
Tabla 36: Resultados PE2 - ER2 - SMI.....	74
Tabla 37: Resultados PE2 - ER3 - CMI.	74
Tabla 38: Resultados PE2 - ER3 - SMI.....	75
Tabla 39: Resultados PE3 - ER1 - CMI.	75
Tabla 40: Resultados PE3 - ER1 - SMI.....	75
Tabla 41: Resultados PE3 - ER2 - CMI.	76
Tabla 42: Resultados PE3 - ER2 - SMI.....	76
Tabla 43: Resultados PE3 - ER3 - CMI.	76
Tabla 44: Resultados PE3 - ER3 - SMI.....	77
Tabla 45: Detalle de tiempos e interferencias para los puntos de extracción.....	77
Tabla 46: Detalle de tiempos y reparaciones para los puntos de extracción.	78
Tabla 47: Detalle de tiempos e interferencias para la correa.....	79

Tabla 48: Detalle de tiempos y reparaciones para la correa.	80
Tabla 49: Uso de equipos y recursos (1).	81
Tabla 50: Uso de equipos y recursos (2).	82
Tabla 51: Detalle del porcentaje de extracción.	82
Tabla 52: Máximas toneladas procesables por componente para cada escenario.	85

1. INTRODUCCIÓN

En minería subterránea, existen distintos métodos de explotación dependiendo de las condiciones en que se encuentre el yacimiento. Entre ellos el Block/Panel Caving, que originalmente se aplicaba en yacimientos masivos de grandes dimensiones, con rocas mineralizadas medianamente competentes¹ y un alto índice de fracturas, que hundían con facilidad, quebrándose en fragmentos de tamaño reducido. Sin embargo, con las tecnologías actuales, en Chile se aplica también en macizos rocosos competentes que producen fragmentación gruesa.

En Block/Panel Caving con mineral grueso, requiere el uso de sistemas de manejo de materiales compatibles con colpas del orden de 1,5m., para lo cual se usan cargadores frontales de gran capacidad (LHD) y chancadores subterráneos. El proceso productivo se inicia con la extracción del mineral a partir de los puntos de extracción, el cual fluye por acción de la gravedad hacia el nivel de producción, posteriormente es trasladado hacia el nivel de transporte para ser llevado a su destino final, la planta concentradora. Cada uno de los componentes de este proceso cuenta con equipos e infraestructuras determinados, por ejemplo en el nivel de producción se encuentran los puntos de extracción, los equipos LHD para el traslado de mineral, piques de traspaso en donde el LHD descarga el mineral que transporta y martillos picadores que reducirán el tamaño de las rocas que ingresarán al pique de traspaso hacia el nivel de transporte.

Así como en el nivel de producción se cuenta con equipos e infraestructuras, aguas abajo se presentan otros como correas transportadoras, chancadores, acopios, camiones, trenes, skips, etc. dependiendo del sistema de manejo de minerales con que se haya diseñado la mina.

Uno de los factores más importantes en la planificación minera es el ritmo de producción que se desea alcanzar, del cual depende el dimensionamiento de los componentes del sistema de manejo de minerales. En la cadena productiva, pueden ocurrir distintos eventos dependientes de la operación o del macizo rocoso, que pueden afectar la continuidad de operación del sistema de manejo de materiales, en consecuencia, para obtener una planificación realista es necesario considerar todos los eventos que pudiesen afectar o interferir en la operación del sistema de manejo de minerales, entre los cuales están: colgaduras en los puntos de extracción, presencia de bolones en la parrilla de descarga de LHD, falla en infraestructura, fallas en equipos, u otros con efectos similares.

Las simulaciones de distintos escenarios operacionales son útiles para evaluar el desempeño de sistemas complejos, a partir de un muestreo estadístico controlado y pueden ser aplicadas cuando los modelos analíticos no son suficientes para explicar un fenómeno o éste es muy complejo para traducirlo en expresiones matemáticas.

¹ Se requiere que la roca mineralizada tenga una calidad entre 3A a 4A y la roca estéril del techo debe ser hundible.

Este trabajo considera la construcción de un modelo del sistema de manejo de minerales utilizado en el Proyecto de Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) y a partir de estudios disponibles de distribución de probabilidades de ocurrencia de las interferencias operacionales a lo largo de la cadena productiva, se llevan a cabo simulaciones de distintos escenarios con el propósito de determinar la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de manejo de materiales.

1.1. Motivación del trabajo

Dado que en la actualidad se tienen estudios que incorporan las probabilidades de fallas de equipos e infraestructuras de distintos sistemas de manejo de minerales por separado, es necesario obtener los resultados de la influencia de todas y cada una de las variables que afectan en la confiabilidad y disponibilidad del sistema completo, para evaluar la certeza del cumplimiento del programa de producción identificando los cuellos de botella existentes en el sistema.

La ingeniería de confiabilidad representa una disciplina que ha sido adoptada dentro del diseño de procesos, confiabilidad de procesos, ingeniería de detalle y operaciones, además de su aplicación formal en ingeniería de mantenimiento² y sistema de seguridad.

Dentro del ciclo de vida de un proyecto minero, es posible aplicar la ingeniería de mantenimiento para:

- Evaluar, en la etapa de diseño de un proceso, la disponibilidad y confiabilidad tomando como base las tasas de fallas del equipo dinámico de proceso y determinar si la configuración y equipo seleccionado cumplirán con el factor de servicio requerido.
- Determinar el almacenamiento óptimo de productos de entrada y salida con base en la probabilidad del suministro de materia prima, los requerimientos del producto y la confiabilidad del proceso.
- Evaluar la probabilidad de falla en demanda y falsas alarmas del sistema de protección.
- Elaborar programas de mantenimiento predictivo basados en tasas de falla por modo de falla.
- Evaluar el inventario óptimo de refacciones de equipos críticos.
- Evaluar la probabilidad de un incidente en una planta o instalación de proceso a través de la construcción y cuantificación de árboles de eventos y árboles de fallas.

Para obtener lo anterior, las simulaciones permiten conducir experimentos con relaciones matemáticas y lógicas, para describir el comportamiento y estructura de sistemas

² Melo, R., Lara, C., Jacobo, F. 2009. *Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería*. Instituto Mexicano del Petróleo, México.

complejos a través de períodos de tiempo: de esa forma se puede evaluar nuevas estrategias para el funcionamiento del sistema.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del trabajo consiste en:

- Determinar la confiabilidad operacional del proceso de manejo de minerales al interior mina a partir de un modelo de simulación integrado.

1.2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos del trabajo se tienen los siguientes:

- Realización de simulaciones de distintos escenarios con la variación de parámetros operacionales.
- Determinar cuantitativamente la disponibilidad teórica del sistema y el impacto de las labores de mantención u operación en el uso de equipos.

1.3. Alcances

El trabajo a realizar tiene como caso base el sistema de manejo de minerales que se utilizará en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, identificando los sistemas y principales subsistemas que lo componen, tomando el macrobloque N5-1 como referencia.

Las interferencias operacionales que se consideran incluyen las fallas tanto de equipos como de infraestructuras. Se consideran el uso de mantenciones programadas e inspecciones preventivas.

Los datos de las probabilidades de falla de los sistemas y subsistemas, se obtendrán de sistemas de manejo de minerales implementados en minas de similares características como lo son Andina de Codelco y DOZ de Freeport. En el caso que no se tenga directamente la estadística, se tomarán como referencia valores típicos de la industria.

El software a utilizar para la programación y validación del modelo es *Availability Workbench*®, el cual utiliza como método de simulación el método de Montecarlo.

Por otro lado, el modelo a implementar no considera ciertos parámetros como las leyes del mineral que se extrae, posibles huelgas de parte de los trabajadores o eventos de colapsos de gran magnitud de las infraestructuras como lo es un estallido de roca o colapso de un pique de traspaso, entre otros.

Otras de las consideraciones que es importante destacar es que el sistema a simular comprende desde los puntos de extracción hasta la descarga en correas desde la estación de chancado, sin considerar el nivel de hundimiento ni ventilación.

1.4. Metodología

La metodología a desarrollar en el presente trabajo se detalla a continuación:

- Definir las componentes del sistema de manejo de minerales a estudiar.
- Identificar los eventos que pueden ocurrir en la infraestructura y equipos que componen el sistema e identificar las variables, parámetros y datos que sean necesarios.
- Recopilar, filtrar y ordenar la información disponible con respecto a la ocurrencia de eventos.
- Ajuste de la distribución las probabilidades de ocurrencia de los eventos identificados.
- Construcción de un modelo de simulación que reproduzca el funcionamiento del sistema minero en estudio.
- Validación del modelo con información histórica y revisión de lógica del cumplimiento de las condiciones para los escenarios de simulación.
- Realizar simulaciones computacionales, con distintos escenarios operacionales.
- Análisis de modelo de simulación con respecto a la disponibilidad y confiabilidad del sistema productivo y el impacto de las interferencias operacionales.
- Conclusiones y recomendaciones.

2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. Estado del arte

Existen múltiples trabajos que estudian las interferencias operacionales en los sistemas mineros. Uno de los estudios realizados que introduce la teoría de la confiabilidad de un sistema como unidad básica de explotación y como afecta en el plan de producción, es el realizado por Rubio³, en donde se tomaron en cuenta los eventos ocurridos en los puntos de extracción y la influencia en la capacidad productiva de una mina explotada por Block Caving. En dicho trabajo se relaciona la frecuencia de eventos de colgadura y sobretamaño con la productividad de la mina, tomando como base las investigaciones realizadas por Kazakidis y Scoble⁴ en las que muestran que un sistema minero subterráneo se podría modelar utilizando la Teoría de Confiabilidad, la que usa diagramas de bloques para la probabilidad de falla de un determinado componente del sistema.

Otro de los trabajos realizados corresponde a la cuantificación del impacto que generan las interferencias operacionales en la productividad del sistema minero, en donde Troncoso⁵ estudió a Andina de Codelco.

En minería de Block Caving uno de los cuellos de botella de la productividad en la planificación es la velocidad máxima de extracción de un punto en un periodo dado, por ello es que Troncoso en su trabajo realiza simulaciones para estudiar el impacto de las interferencias operacionales en los equipos (por ejemplo en los tiempos de ciclo de un LHD), considerando colgaduras, sobretamaño, barro, entre otros. Los resultados obtenidos permiten cuantificar la capacidad productiva máxima, cuantificando el tonelaje máximo que un cruzado de transporte es capaz de sostener por un tiempo determinado.

Otro de los estudios realizados con respecto al tema de cómo afecta la disponibilidad de equipos en la producción, es aquel que incorpora el concepto de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para los equipos y la confiabilidad de asignación y planes de producción, realizado por Prieto⁶, en donde se tomó como base la mina Spence de BHP Billiton. En este estudio se desarrolla una metodología que permite incorporar la confiabilidad del equipo minero en la planificación minera y en la estrategia de asignación, incorporando métricas probabilísticas a ciertos factores operacionales que

³ Rubio, E. 2005. *Mine Infrastructure Reliability Applied to Production Planning*. University Of British Columbia. Vancouver, Canadá.

⁴ Kazakidis, V. N., Scoble, M. 2003. *Planning for Flexibility in Underground Mine Production Systems*. SME Publications.

⁵ Troncoso, S. 2006. *Simulación del Impacto de Interferencias Operacionales para la Planificación de la Producción*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

⁶ Prieto, P. 2007. *Incorporación de la Confiabilidad en la Planificación Minera y en la Asignación de Equipos*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

influyen en el rendimiento. Se estimó la confiabilidad del equipo minero y el sistema de carguío y transporte de la mina el cual se interpreta como un modelo de confiabilidad de estructuras en series, en paralelo, redundantes, etc. y también se calculó la confiabilidad del sistema para distintas metas productivas para así obtener una medida de la incertidumbre asociada a cierto tonelaje a extraer.

El trabajo realizado por Salamanca⁷, tomó como caso base la mina Esmeralda de El Teniente perteneciente a Codelco. Se desarrolla una metodología complementaria en la evaluación de un programa de producción minero anual, incorporando interrupciones operacionales producto de eventos geotécnicos, utilizando la teoría de la confiabilidad y aplicando redundancia activa para obtener un nivel de confiabilidad deseado.

Para la evaluación del programa de producción se consideraron tasas de fallas aplicadas sólo a los puntos de extracción, que representan los eventos geotécnicos mencionados anteriormente, también consideró un tonelaje libre de riesgo, el que corresponde al tonelaje mínimo extraído en condiciones normales y el tonelaje objetivo máximo el que representa el 100% de confiabilidad. El resultado principal de este estudio indica que la incorporación de la teoría de la confiabilidad es necesaria como método de evaluación de programas de producción por la incorporación de eventos no predecibles pero sí estimables con respecto a su frecuencia durante la vida útil de un punto de extracción.

Así como se han analizado la influencia de los puntos de extracción y sus eventos geotécnicos colgadura y sobretamaño, como también la confiabilidad de los equipos para los respectivos planes de producción, también se han estudiado las interferencias operacionales en los piques de traspaso y cómo estas afectan al plan de producción. Cornejo⁸ consideró como caso de estudio la mina DOZ de Freeport, y dicho estudio tuvo como objetivo cuantificar el efecto del sistema de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción minero, en particular en la productividad de cruzados de producción.

2.2. Origen de la teoría de confiabilidad

Las investigaciones realizadas por Kazakidis y Scoble⁹, muestran que un sistema minero subterráneo se podría modelar utilizando la Teoría de Confiabilidad, la cual usa diagramas de bloques para estimar la probabilidad de falla de las componentes para un determinado sistema minero. A continuación, se muestra un diagrama de un sistema productivo minero subterráneo:

⁷ Salamanca, F. 2007. *Aplicación de la Redundancia Activa en la Programación de Producción de Mina Subterránea*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

⁸ Cornejo, M. 2008. *Impacto en la Productividad del Nivel de Traspaso en la Confiabilidad de un Programa de Producción*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

⁹ Kazakidis, V. N., Scoble, M. 2003. *Planning for Flexibility in Underground Mine Production Systems*. SME Publications.

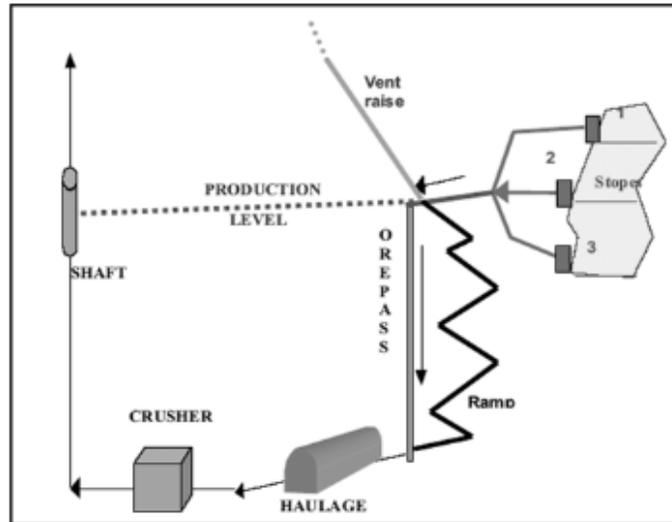


Figura 1: Componentes de un sistema minero tradicional.

El sistema de confiabilidad es definido por Ramakumar¹⁰ como la probabilidad de que el sistema funcione por un rango específico de tiempo bajo determinadas condiciones.

Además, afirma que para determinarla existen 3 pasos fundamentales que son:

- Construir el modelo de confiabilidad (representativo y simple, basado en suposiciones que deben ser válidas, descomponible y operativo).
- Analizar el modelo y calcular un índice de falla (uno para cada componente).
- Evaluar e interpretar los resultados (precisión de los resultados, comparar con otros períodos ya conocidos).

Los cálculos de confiabilidad pueden soportar decisiones de diseño basadas en criterios económicos, en la Figura 2 se muestra el Ciclo de Confiabilidad a través de sus interrelaciones a partir de bases de datos de tasas de falla (Jinhua y Erlang¹¹) y sus etapas de ingeniería y mantenimiento (Samset¹²), incluyendo rediseños e instalaciones.

¹⁰ Ramakumar, R. 1993. *Engineering Reliability. Fundamentals and Applications*. Prentice Hall. Nueva York, EEUU.

¹¹ Jinhua, D., Erlang, O. 2003. *Availability analysis through relations between failure rate and preventive maintenance under condition monitoring*. Mälardalen University. Västeras, Suecia.

¹² Samset, O. 1988. *Reliability estimation based on operating history of repairable systems*. Norwegian Institute of Technology. Trondheim, Noruega.

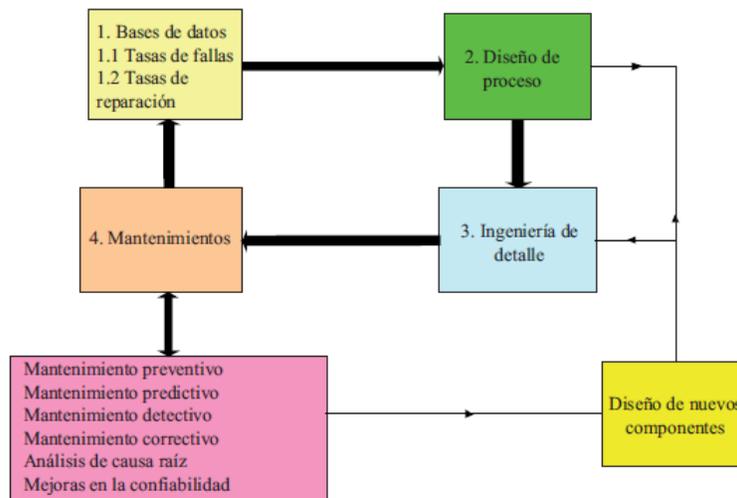


Figura 2: Ciclo de confiabilidad.

La especificación del diseño de componentes y equipos, los cuales tienen impacto sobre la confiabilidad y disponibilidad deberán ser complementados con un estudio de confiabilidad – disponibilidad – mantenibilidad CDM.

2.2.1. Confiabilidad

La confiabilidad de un equipo o infraestructura es la probabilidad de que desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas. La confiabilidad es una medida que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento y ayuda en el momento de seleccionar un equipo entre varias alternativas.

- a) **Función confiabilidad:** la confiabilidad se define como la probabilidad P_r de que un componente funcione durante un periodo de tiempo t . Lo anterior se puede expresar matemáticamente por una variable aleatoria continua T como el tiempo de falla del componente cuando $T \geq 0$. Se define por:

$$R(t) = P_r\{T \geq t\}$$

La función $R(t)$ se emplea para estimar la confiabilidad.

- b) **Función de distribución de fallas acumuladas:** es la probabilidad de que un elemento no falle en el instante t o antes de t . Se define por:

$$F(t) = 1 - R(t) = P_r\{T < t\}$$

- c) Función de densidad de probabilidad de fallas: es la probabilidad de falla de un elemento por unidad de tiempo, en cada instante t , es decir, es el cociente entre la probabilidad de que un elemento falle en el intervalo $(t, t + \Delta t)$ y Δt . Se define por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

La cual es llamada la función de densidad de probabilidad. Esta función describe la forma de la distribución de fallas y se emplea para estimar probabilidad de fallas. Esta función no es más que una distribución de probabilidad.

Partiendo de la definición de la función de distribución de fallas acumuladas antes mencionada se obtiene la siguiente expresión:

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx$$

Con lo que la función para determinar la confiabilidad de un equipo también puede ser:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx$$

- d) Función de tasa de falla: es la probabilidad de que un elemento que está funcionando en el instante t deje de funcionar en el intervalo $t + \Delta t$.

La función de tasa de fallas $\lambda(t)$ proporciona la descripción de la distribución de fallas. La función $\lambda(t)$ describe el comportamiento del número de fallas de una población por unidad de tiempo. Se expresa por la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{d(\ln R(t))}{dt}$$

La función $\lambda(t)$ es una característica única de la variable tiempo para fallas de una población de componentes, equipos o sistemas.

- e) Tiempo medio para fallas (*MTTF*, siglas en inglés):

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

Corresponde a la media o valor esperado, de la distribución de probabilidad definida por $f(t)$. La media de la distribución de fallas es sólo una de las medidas de tendencia central de la distribución. El *MTTF* es el estimado puntual más clásico

en el área de confiabilidad, ya que es el parámetro de interés en la selección de equipos y diseños de sistemas.

- f) Tiempo medio entre fallas (*MTBF*, siglas en inglés): es la vida media del elemento y es la esperanza matemática del tiempo de funcionamiento hasta el fallo de un elemento cuya densidad de fallas es $f(t)$:

$$E(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

Además según Bazovsky¹³, la tasa de falla se puede descomponer en 3 etapas que han sido observadas en componentes o equipos mecánicos. Éstas conforman la llamada curva tipo “tina de baño” y se describen a continuación:

- Mortalidad infantil (tasa de fallas decreciente): son las “fallas de fábrica” o “fallas de origen”, producto de una mala fabricación del componente o equipo y se solucionan con procesos preventivos que consisten en probar el equipo y reemplazar lo que falla antes de ponerlo en operación.
- Fallas aleatorias (tasa de fallas constante): ocurren cuando el equipo ya está en operación, no se pueden eliminar ni predecir, pero siguen ciertas reglas de comportamiento en que la frecuencia por largos períodos de tiempo es aproximadamente constante.
- Envejecimiento o desgaste (tasa de fallas creciente): ocurren al final de la vida útil del equipo producto de desgaste y cuando los componentes tienen poca mantención. La ventaja de éstas es que se pueden predecir.



Figura 3: Representación "Curva de la Bañera".

¹³ Bazovsky, I. 1961. *Reliability: Theory and Practice*. New Jersey. EEUU.

Cada una de estas etapas sigue una distribución específica que para su determinación deben ser usados diferentes modelos matemáticos.

2.2.2. Disponibilidad

El concepto de disponibilidad¹⁴ se desarrolló originalmente para sistemas reparables que requerían operar continuamente, y que en cualquier punto aleatorio del tiempo se puedan encontrar operando o fuera de operación debido a una falla sobre la cual se está trabajando para restaurar la operación en un tiempo mínimo. La disponibilidad es una medida importante y útil en casos en que el usuario deba tomar decisiones para elegir un equipo entre varias alternativas. Para tomar una decisión objetiva con respecto a la adquisición del nuevo equipo, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas, en donde la disponibilidad puede suministrar una imagen más completa sobre el perfil de funcionalidad. La disponibilidad está basada únicamente en la distribución de fallas y la distribución de tiempo de reparación. Ésta puede ser además usada como un parámetro para el diseño:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde A corresponde a la disponibilidad (“Availability”)

2.2.3. Mantenibilidad

La mantenibilidad es una medida de qué tan fácil y rápido puede un sistema o equipo restaurarse a un estado de operación después de una falla. Es función del diseño del equipo y la instalación, disponibilidad del personal con los niveles de habilidad requeridos, procedimientos de mantenimiento y de prueba de equipo adecuado y el ambiente físico bajo el cual se lleva a cabo el mantenimiento.

La ingeniería de mantenibilidad se crea cuando los diseñadores y fabricantes comprenden la carencia de medidas técnicas y disciplinas científicas en el mantenimiento. Por ello que corresponde a una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para conservar la mantenibilidad de un producto y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación y mejora.

Similarmente a la confiabilidad la expresión matemática para la mantenibilidad viene dada por:

$$M(t) = \int_0^t g(t) dt$$

¹⁴ Jinhua, D., Erlang, O. 2003. *Availability analysis through relations between failure rate and preventive maintenance under condition monitoring*. Mälardalen University. Västerås, Suecia.

Donde $g(t)$ es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria (tiempo para reparar).

2.2.4. Diagramas de bloques de confiabilidad

Existen diferentes técnicas para modelar el estudio sistemático de los sistemas desde el punto de vista de confiabilidad. Entre estas técnicas se encuentran los modelos de Markov, los árboles de falla (Henley y Kumamoto¹⁵, Hoyland y Rausand¹⁶, Modarres y col.¹⁷) el análisis de modos y efectos de falla (Stamatis¹⁸), y los diagramas de bloque de confiabilidad (IEC¹⁹).

En el trabajo realizado se utilizaron conjuntamente los diagramas de bloques de confiabilidad y la simulación de Montecarlo.

Los diagramas de bloques de confiabilidad (RBD, por sus siglas en ingles), ilustran la funcionalidad de un sistema. La confiabilidad es la probabilidad de operación exitosa durante un intervalo de tiempo dado. En un diagrama de bloques se considera que cada elemento funciona (opera exitosamente) o falla independientemente de los otros.

- *Sistema en serie*: Si un sistema funciona si y solo si todos componentes funcionan, se dice que el sistema tiene una estructura en serie. Desde el punto de vista de confiabilidad, un sistema en serie es definido como aquel sistema en donde todos sus componentes deben operar para que el sistema en su totalidad opere.
- *Sistema en paralelo*: Un sistema que funciona si al menos uno de sus componentes está funcionando se dice que tiene una estructura en paralelo. Desde el punto de vista de confiabilidad, un sistema en paralelo se define como aquel sistema en donde todos sus componentes deben fallar para que el sistema en su totalidad no opere.

¹⁵ Henley, E. J., Kumamoto, H. 1992. *Probabilistic risk assessment: Reliability engineering, desing, and analysis* .IEEE Press. Nueva York, EEUU.

¹⁶ Hoyland, A., Rausand, M. 1994- *System reliability theory: Models, statistical methods*. John Wiley and Sons. Nueva York, EEUU.

¹⁷ Modarres, M., Kaminskiy, M., Krivtsov, V. 1999. *Reliability engineering and risk analysis. A practical guide*. Marcel Dekker. Nueva York, EEUU.

¹⁸ Stamatis, D. H. 2003. *Failure mode and effect analysis. FMEA from Theory to Execution*. ASQ Quality Press. Milwaukee, EEUU.

¹⁹ IEC. 1991. *Analysis techniques for dependability-reliability block diagram methods*. IEC 1078 91, International Electrotechnical Commission. EEUU.

Por otro lado, para sistemas de componentes múltiples, Calabro²⁰ propone que pueden estar unidos de cuatro formas, en donde cada componente tiene una confiabilidad $R(T)_i$, entonces la confiabilidad del sistema será (con $R(T)_i + Q(T)_i = 1$):

a) Sistema en serie

$$R(T)_{sist} = \prod_i R(T)_i$$

En este sistema si falla un componente falla todo el sistema.

b) Sistema en paralelo

$$1 - R(T)_{sist} = \prod_i (1 - R(T)_i)$$

En este sistema tienen que fallar todos los componentes para que falle todo el sistema.

c) Sistema de series paralelas

$$1 - R(T)_{sist} = \prod_i (1 - R_{SERIES}(T)_i)$$

Este sistema está compuesto de series en paralelo, si falla un componente, la serie completa falla, pero el sistema sigue trabajando con las otras series que están en paralelo a la que falló. Para que falle totalmente el sistema, debe fallar al menos un componente de cada serie.

d) Sistema de series de paralelos

$$R(T)_{sist} = \prod_i R_{PARALELO}(T)_i$$

Este sistema está compuesto por subsistemas en paralelo y cada uno de estos subsistemas está en serie. Para que falle todo el sistema se necesita que fallen todos los componentes de un subsistema.

²⁰ Calabro, S. 1962. *Reliability principles and practices*.

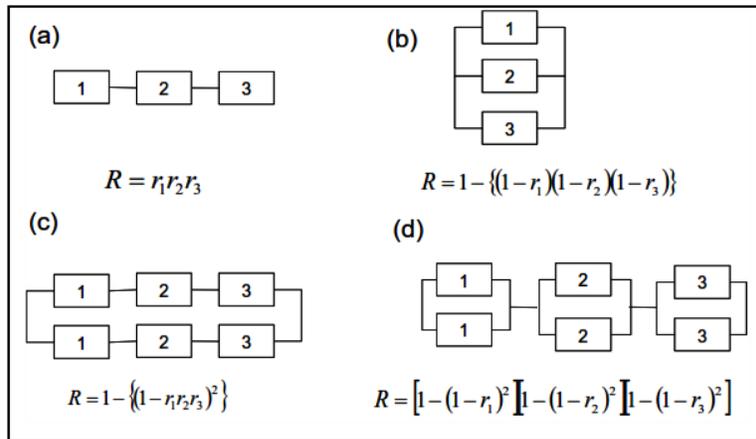


Figura 4: Configuraciones de los 4 sistemas múltiples.

2.2.5. Análisis de CDM

La construcción de un modelo de confiabilidad permite desarrollar un análisis de sensibilidad para identificar los equipos y sistemas de alto impacto en la disponibilidad de procesos, a fin de proponer acciones de mitigación basados en un análisis de costo-riesgo, que permite a la gerencia del proceso productivo analizado, tener el conocimiento sobre el riesgo asociado y los costos de los planes de intervención debido a mantenimiento planificado y no planificado.

2.3. Simulación

2.3.1. Definición

La simulación²¹ es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y realizar pruebas con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

La simulación permite resolver problemas complejos, aunque lo que se obtendrá será una aproximación de la solución. Por ejemplo, los problemas que pueden ser solucionados con simulaciones son los relacionados con la organización industrial a través de la construcción de modelos matemáticos que representan la realidad. Sin embargo, no todos los problemas son abordables mediante simulación.

La utilización de modelos de simulación permite:

- Introducir nuevas variables.
- Hacer variar sus valores.

²¹ Rodriguez, J. 2011. «Simulación, Método de Montecarlo», Métodos Cuantitativos Organización Industrial.

- Analizar las consecuencias de estas modificaciones.

Dichos modelos, surgen de un análisis de todas las variables intervinientes en el sistema y de las relaciones que se descubren existen entre ellas. A medida que avanza el estudio del sistema se incrementa el entendimiento que se tiene del modelo y ayuda a crear modelos más cercanos a la realidad.

El modelo que se construye debe tener en cuenta todos los detalles que interesan en el estudio para que realmente represente al sistema real (modelo válido). Por razones de simplicidad deben eliminarse aquellos detalles que no interesan y que lo complicarían innecesariamente. Se requiere pues, que el modelo sea una fiel representación del sistema real, sin embargo, el modelo no tiene porqué ser una réplica de aquél. Consiste en una descripción del sistema, junto con un conjunto de reglas que lo rigen.

Dado un sistema, son muchas las representaciones que se pueden hacer de él. Depende de las facetas del sistema que interesan en el estudio, de la herramienta que se utiliza en el mismo e incluso de la modalidad personal el que lo construye.

En los modelos deben estar identificadas perfectamente las entidades intervinientes y sus atributos. Las mismas pueden ser permanentes o transitorias.

2.3.2. *Ventajas y desventajas*

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la simulación.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Es un método directo y flexible, además existe un amplio abanico de programas y lenguajes destinados a simular. - Cuando el modelo matemático es demasiado complicado la simulación permite obtener una aproximación, incluso resolviendo problemas que no tiene solución analítica. - La simulación permite formular condiciones extremas con riesgos nulos, sin afectar a la realidad. - Permite estudiar la interacción entre las diferentes variables del problema, prediciendo las consecuencias que tendría una decisión determinada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Una buena simulación puede resultar muy complicada, debido al gran número de variables. - La simulación no genera soluciones óptimas globales. - No proporciona la decisión a tomar, sino que resuelve el problema mediante aproximación para unas condiciones iniciales. - Cada simulación es única, interviene el azar.

2.3.3. Etapas del proceso de simulación

Las etapas de un proceso de simulación, pueden clasificarse en las siguientes, además en la Figura 5 se muestra un esquema de las etapas:

- Definición, descripción del problema, plan.
- Formulación del modelo.
- Programación.
- Verificación y validación del modelo.
- Diseño de experimentos y plan de corridas.
- Análisis de resultados.

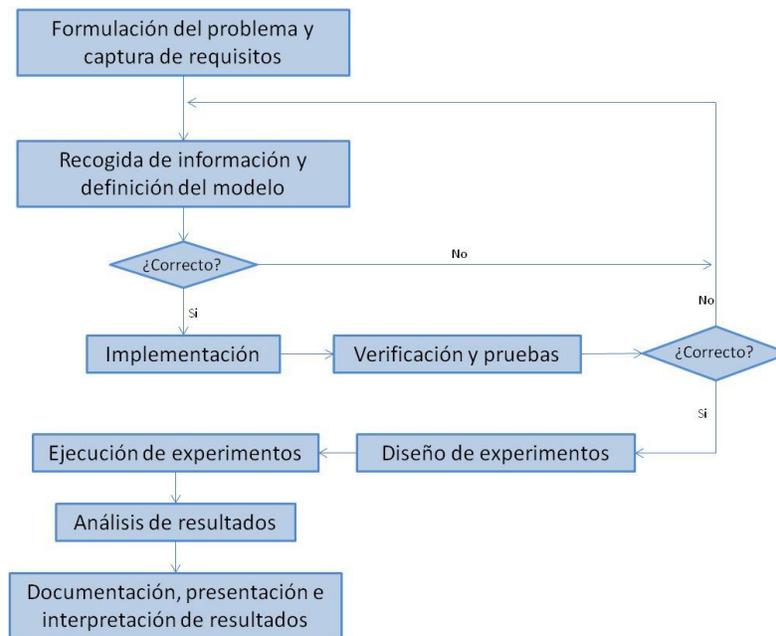


Figura 5: Esquema de las etapas del proceso de simulación.

2.3.4. Tipos de modelos de simulación

Dentro de los modelos de simulación existentes, se pueden clasificar en los que se muestran a continuación:

Tabla 2: Modelos de simulación.

vs	
Estática	Dinámica
La representación de un sistema para un instante en particular, o un sistema en que el tiempo no es importante.	La representación de un sistema en que el tiempo es la variable de interés.
Determinista	Estocástica
Cuando el modelo no considera ninguna variable importante, comportándose de acuerdo con una ley probabilística. La salida queda determinada con los datos y relación con la entrada.	Cuando el modelo toma en cuenta algún componente aleatorio en la entrada.
Continua	Discreta
Son aquellos modelos definidos por un sistema continuo, es decir, que pueden tomar distintos valores en tanto magnitud y tiempo, o bien, el uso de sus componentes puede considerarse siempre.	Son aquellos modelos definidos por un sistema discreto, es decir, los valores están acotados dentro de ciertos rangos, o bien, el uso de sus componentes debe detenerse o algo por el estilo.

Se debe estimar y analizar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad a través de un enfoque diferente conocido como simulación estocástica. Dentro de la simulación estocástica se pueden emplear Markov o Montecarlo. Un proceso estocástico representa una serie de eventos con salidas aleatorias, usualmente indexadas con respecto al tiempo. Así, la simulación estocástica es análoga a efectuar las pruebas o corridas. La generación de “datos empíricos” a través de la simulación estocástica es conveniente ya que permite visualizar, por ejemplo, el desempeño de la instalación como sistema, o bien, las incertidumbres que pueden ocurrir en el contexto operacional actual.

2.3.5. Método de Montecarlo

El método de Montecarlo es una técnica que involucra el uso de números aleatorios y probabilidad para resolver problemas complejos, ya que el sistema es muestreado en un número de configuraciones aleatorias y los datos pueden ser usados para describir el sistema como un todo. Por sus propiedades, la simulación Montecarlo es el método más usado para la solución de problemas dinámicos de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de sistemas industriales. Así, dados los desarrollos actuales en software y hardware, actualmente la simulación de Montecarlo es una técnica poderosa para desarrollar análisis de la confiabilidad – disponibilidad – mantenibilidad de sistemas industriales que están muy apegados a la realidad de los sistemas complejos.

a) Números aleatorios

El fundamento del método de Montecarlo y de la simulación son los números aleatorios, los cuales se pueden obtener mediante las siguientes herramientas:

- Tablas de números aleatorios
- Generadores de números aleatorios
- Número pseudo-aleatorios
 - Método de los centros cuadrados
 - Métodos congruenciales
 - Generador multiplicativo
 - Generador mixto

b) Algoritmo

El algoritmo de simulación de Montecarlo²², está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias:

- Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas (F).
- Generar un número aleatorio uniforme $\epsilon (0,1)$.
- Determinar el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases que tengamos.
- Calcular media, desviación estándar error y realizar el histograma.
- Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

2.4. Distribuciones de probabilidades

Dentro de las características que tiene el implementar un modelo integrado de simulación, está el darle variabilidad a la ocurrencia de eventos. Es por ello, que el software *Availability Workbench*²³ cuenta con el módulo de *Weibull Sets*, en donde el usuario puede elegir distintos métodos de cálculo para el ajuste de la distribución de probabilidad adecuada, de acuerdo a los datos históricos con que se cuente, tanto como para las fallas o como para los tiempos asociados a la reparación.

Weibull Sets permite al usuario ajustar una distribución manualmente, o bien, mediante el uso de algoritmos, el software puede ajustar automáticamente una distribución. A continuación se presentan algunas de las distribuciones que incorpora el software.

²² Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2005. *Simulación Método Monte Carlo*.

²³ Availability Workbench, 2009. *Isograph Availability Workbench 2009 – User Guide*.

2.4.1. Distribución exponencial

La distribución exponencial puede ser utilizada para el ajuste de fallos de componentes como también para las tareas de mantenimiento (para el muestreo de fallas y el tiempo de reparaciones, respectivamente). Dicha distribución se utiliza para modelar las características de falla de componentes que no presentan envejecimiento. La distribución presenta una tasa de falla constante (o de reparación). Las expresiones que se muestran a continuación corresponden a las usadas para las distribuciones de fallas, por otro lado, para las reparaciones se debe sustituir la tasa de falla por la tasa de reparación y el tiempo medio de falla por el tiempo medio de reparación.

Tabla 3: Parámetros de la distribución exponencial.

Función de densidad de probabilidad	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
No confiabilidad	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Tasa de falla	$r(t) = \lambda$
Tiempo promedio entre fallas	$MTTF = \frac{1}{\lambda}$

2.4.2. Distribución de Weibull con 1 parámetro

La distribución de Weibull se utiliza para modelar las características de componentes que su tasa de falla es dependiente del tiempo, como por ejemplo es el modelar las características de envejecimiento de los componentes mecánicos. Dicha distribución requiere que el usuario especifique el parámetro de forma de la distribución. A continuación se muestran las expresiones utilizadas en dicha distribución:

Tabla 4: Datos de la distribución de Weibull (1 parámetro).

Función de densidad de probabilidad	$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$
No confiabilidad	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$
Tasa de falla	$r(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta}$
Tiempo promedio entre fallas	$MTTF = \eta \Gamma\left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right)$

Con:

η : parámetro de vida característico

β : parámetro de forma

Γ : función gamma

2.4.3. Distribución de Weibull con 2 parámetros

Las expresiones para la distribución de Weibull con 2 parámetros son idénticas a la expresión dada anteriormente para la distribución de Weibull con un parámetro. La única diferencia es que el usuario no especifica el valor del parámetro de forma. El software asignará el parámetro de forma y el parámetro de vida característico a partir de los datos ingresados por el usuario.

2.4.4. Distribución de Weibull con 3 parámetros

Al igual que la distribución de Weibull con 2 parámetros, el software ajusta los parámetros de forma y el de vida, pero además agrega γ , la cual corresponde al parámetro de ubicación de la distribución.

Tabla 5: Datos de la distribución de Weibull (3 parámetros).

Función de densidad de probabilidad	$f(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
No confiabilidad	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
Tasa de falla	$r(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}$
Tiempo promedio entre fallas	$MTTF = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right)$

2.4.5. Bi-Weibull

Si el tiempo transcurrido hasta la falla se origina a partir de dos modos de fallos independientes, se pueden ajustar dos distribuciones de Weibull a los datos. Es por ello que la tasa de falla viene dada de la siguiente manera:

$$r(t) = \frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\eta_1^{\beta_1}} + \frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\eta_2^{\beta_2}}$$

2.4.6. Tri-Weibull

Al igual que el caso anterior, pero ahora considerando tres distribuciones de Weibull:

$$r(t) = \frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\eta_1^{\beta_1}} + \frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\eta_2^{\beta_2}} + \frac{\beta_3 t^{\beta_3-1}}{\eta_3^{\beta_3}}$$

2.4.7. Distribución lognormal

La distribución lognormal puede ser asociada a las tareas programadas o no programadas de mantenimiento, y sus parámetros son los siguientes:

Tabla 6: Datos de la distribución lognormal.

Función de densidad de probabilidad	$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]}$
Tiempo promedio en reparar	$MTTF = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}$
Desviación estándar de reparación	$Std^2 = e^{2\mu + \sigma^2} [e^{\sigma^2} - 1]$
Media (peak de la distribución)	$Media = e^{\mu}$
Moda (valor más probable)	$Moda = e^{\mu + \sigma^2}$

2.4.8. Distribución normal

La distribución normal, al igual que la lognormal, puede ser asociada a las tareas programadas o no programadas de mantenimiento, y su función de densidad de probabilidad es:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$$

Con:

μ : tiempo promedio de reparación

σ : desviación estándar del tiempo promedio

3. DESCRIPCIÓN SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES

Para realizar las simulaciones es necesario conocer de manera detallada el sistema de manejo de minerales que se modelará, identificando las características operacionales de los componentes de éste, ya sean tanto las infraestructuras como los equipos que conforman el sistema. También es necesario conocer los supuestos utilizados en cada etapa y los criterios de operación.

El proyecto de Chuquicamata Subterránea tiene como método de explotación Block Caving, en donde la unidad básica de explotación corresponde a los macrobloques. La extracción planificada cuenta con cuatro niveles, cuyos niveles de hundimiento se encuentran en las cotas 1841/1624/1409/1193 msnm. los cuales se irán explotando secuencialmente desde el más superficial hacia el más profundo a lo largo de la vida útil de la mina. En los dos niveles superiores se utilizará el tipo de hundimiento convencional, mientras que los niveles más profundos se explotarán mediante hundimiento avanzado.

El sistema de manejo de minerales, después del nivel de producción de cada bloque, está compuesto por piques de traspaso, tolvas, estaciones de chancado primario y correas de transporte las cuales llegan finalmente al acopio en superficie. La configuración busca maximizar la continuidad de las operaciones y reducir la cantidad de personal en éstas.

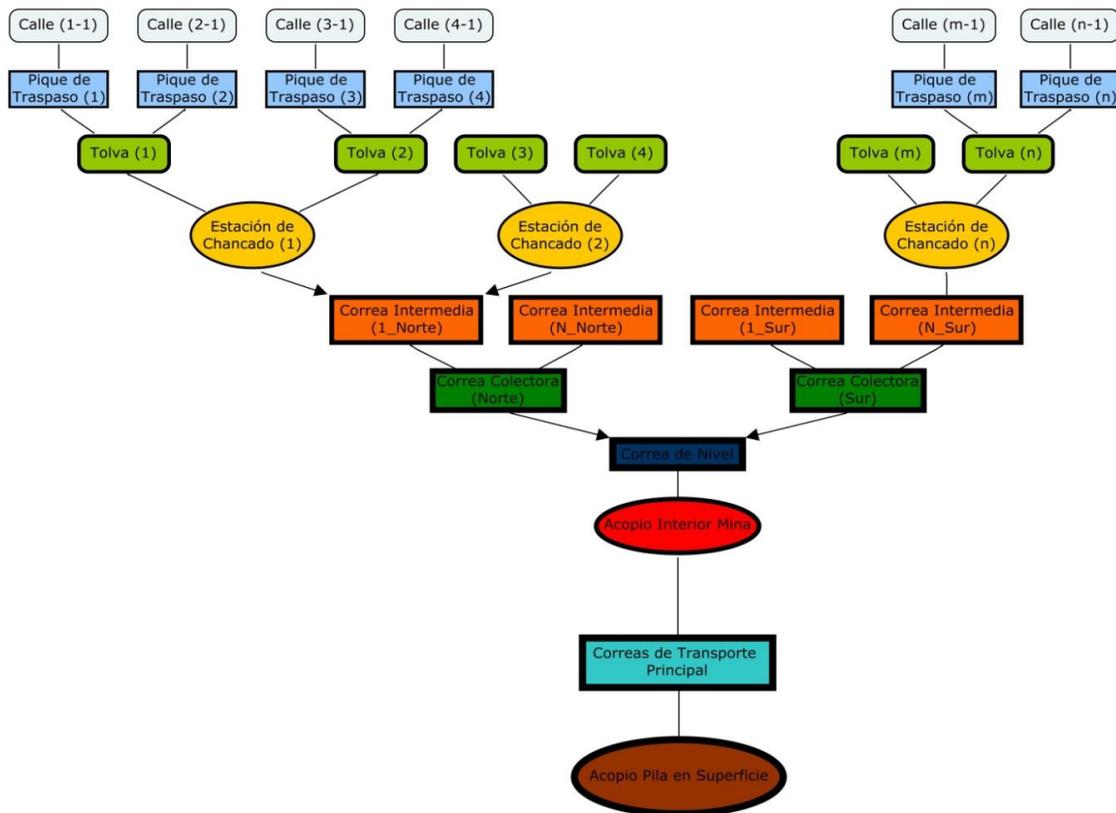


Figura 6: Diagrama conceptual del sistema de manejo de minerales.

En la Figura 6, se aprecia la secuencia que sigue el flujo de mineral, en donde se pueden diferenciar el nivel de producción, subsistema de traspaso-chancado, sistema de correas de transporte intermedia, acopio interior mina, correas de transporte principal y un acopio en superficie mina, las que conforman el sistema de manejo de minerales de Chuquicamata Subterránea.

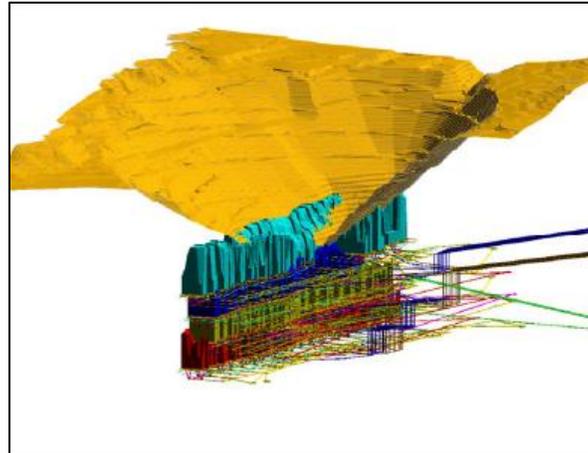


Ilustración 1: Visualización general de la mina con sus niveles.

3.1.1. Macrobloques

Como se dijo anteriormente, la unidad básica de explotación corresponde a macrobloques, los cuales son independientes entre sí en su preparación y producción y sus áreas basales varían entre 24.000 [m²] y 39.000 [m²], a continuación se muestra un esquema del desarrollo de éstos:

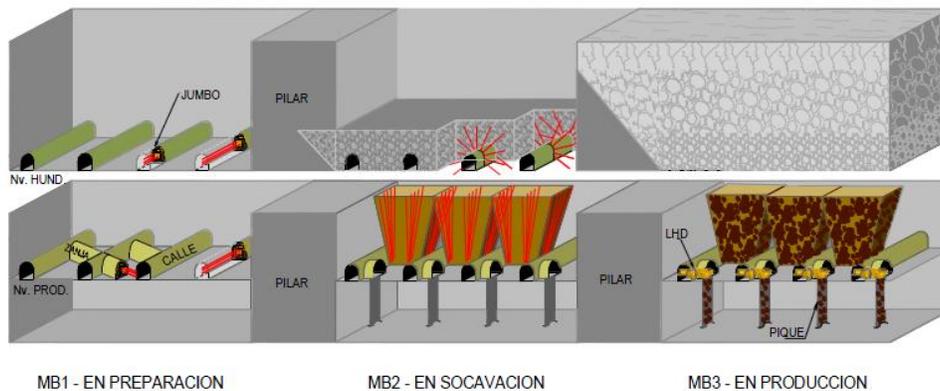


Ilustración 2: Esquema del desarrollo de un macrobloque.

Para los alcances de este estudio, se considerará los criterios de diseño del primer nivel de producción, ubicado en la cota 1841. La disposición de los macrobloques en planta se muestra en la Ilustración 3, en donde el macrobloque de referencia es el N5-1:

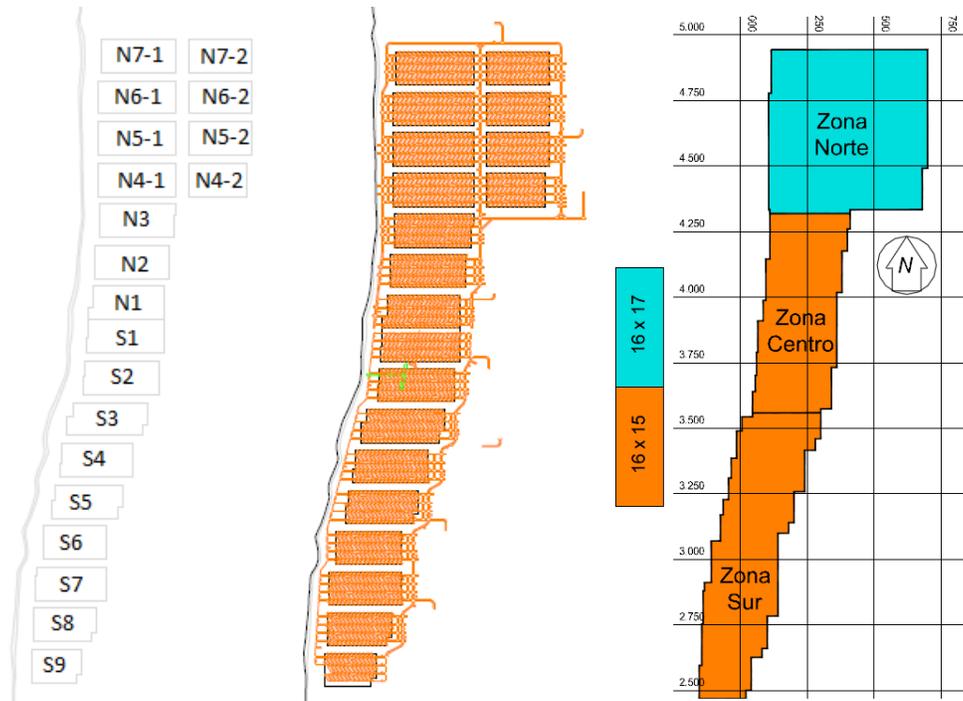


Ilustración 3: Distribución de los macrobloques de explotación.

Cada macrobloque contempla el desarrollo de seis niveles, los que corresponden a los siguientes:

- a) Nivel de hundimiento
- b) Nivel de producción
- c) Nivel de inyección de aire
- d) Nivel de extracción de aire
- e) Nivel de chancado
- f) Nivel de transporte intermedio

Como anteriormente se dijo, para los efectos del estudio a realizar no se consideran los niveles de inyección y extracción de aire, ni tampoco el nivel de hundimiento. Además, el modelo a simular considera el flujo de mineral hasta la descarga del chancado sobre las correas del transporte intermedio.

En la Ilustración 4 y en la Ilustración 5, se presentan las componentes del nivel desde el hundimiento hasta el nivel de chancado.

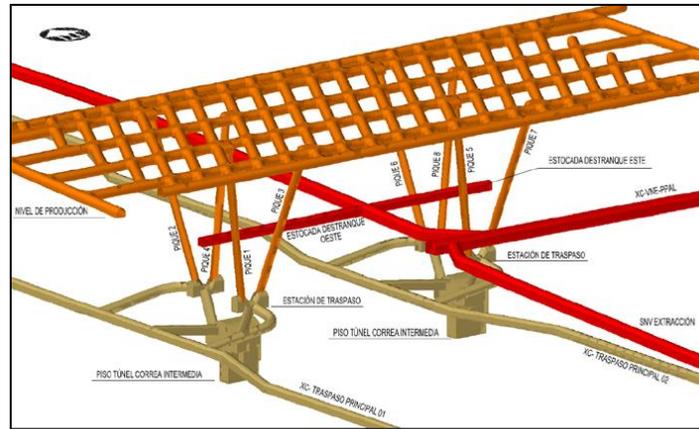


Ilustración 4: Esquema isométrico de los niveles de los macrobloques.

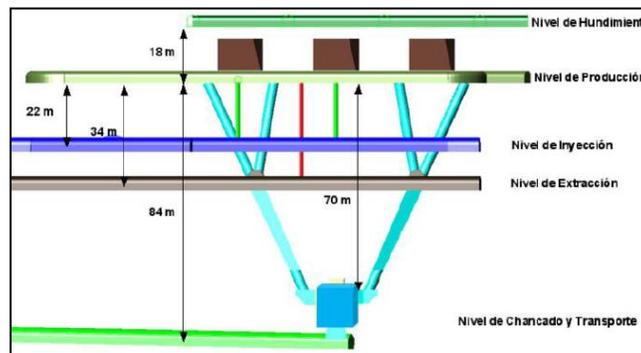


Ilustración 5: Distribución en perfil de las obras del nivel de explotación.

3.1.2. Nivel de Producción

Corresponden a las actividades realizadas en el nivel de producción las cuales se inician cuando el mineral es cargado por el equipo LHD desde el punto de extracción hasta el punto de vaciado. Los componentes de este submodelo son:

1. Puntos de extracción
2. LHD
3. Calles (subcalles)
4. Parrillas
5. Puntos de vaciado
6. Martillos picadores móviles
7. Jumbos de perforación para reducción secundaria
8. Cuadrilla de reducción secundaria

El nivel de producción está compuesto por las calles de producción en donde las instalaciones principales son los puntos de extracción y los puntos de vaciado. En el diseño de Chuquicamata Subterránea, cada calle cuenta por lo general con dos piques de traspaso,

ubicados en tramos equivalentes de la calle, denominados “subcalle”, que constituye la unidad básica de producción donde opera un LHD a la vez, cumpliendo las siguientes condiciones:

- Para la extracción de mineral sólo puede operar un LHD por subcalle.
- La operación de extracción se realiza solo en un segmento de la calle (subcalle) en donde se encuentran los puntos de extracción y un pique de traspaso.
- El LHD transporta el mineral desde los puntos de extracción hasta el pique, que cuenta con una parrilla para regular el tamaño máximo de partículas que ingresan al pique de traspaso.

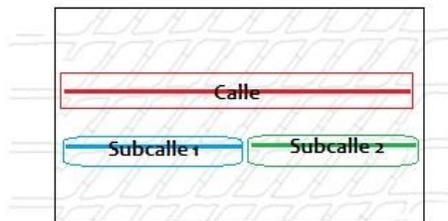


Ilustración 6: Definición de subcalle.

En base a la descripción anterior, se tiene el modelo de bloques que representa el flujo de mineral en cada subcalle del nivel de producción, el que se muestra en la Figura 7:

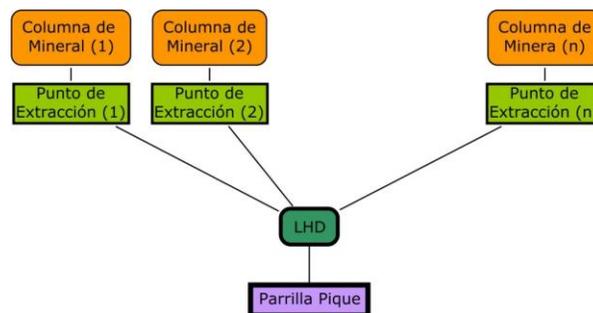


Figura 7: Modelo de bloques del nivel de producción.

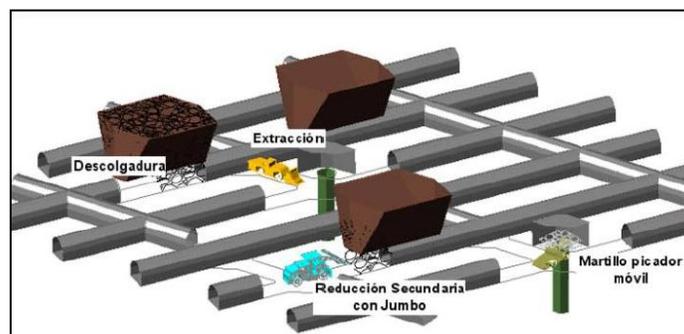


Ilustración 7: Esquema isométrico del nivel de producción.

3.1.3. Traspaso-Chancado

El subsistema de traspaso de mineral comprende desde los piques de traspaso hasta la salida de la estación de chancado. En la Ilustración 8 se muestra un esquema del subsistema.

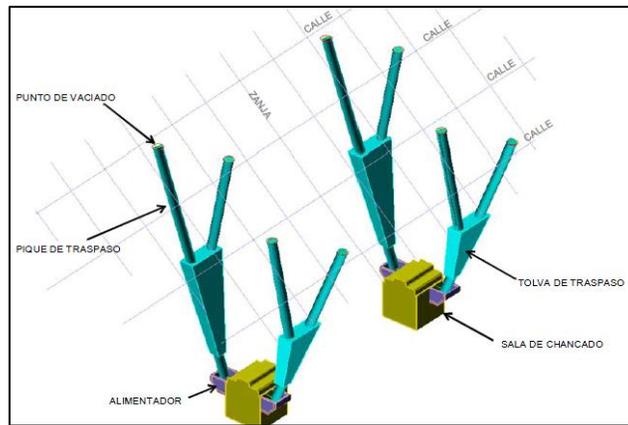


Ilustración 8: Esquema isométrico del nivel de traspaso-chancado.

El material descargado por el LHD, es clasificado en las parrillas y posteriormente fluye por el pique de traspaso hacia una tolva de acopio, la que es alimentada por dos piques de traspaso (dos subcalles, ubicadas en distintas calles), que define un nivel intermedio entre el nivel de producción y el nivel de transporte intermedio. Desde las tolvas, el material es descargado por un alimentador vibratorio que distribuye de manera homogénea el mineral a un chancador de mandíbulas.

El modelo de bloques definido para el subsistema de traspaso – chancado se presenta a continuación en la Figura 8:

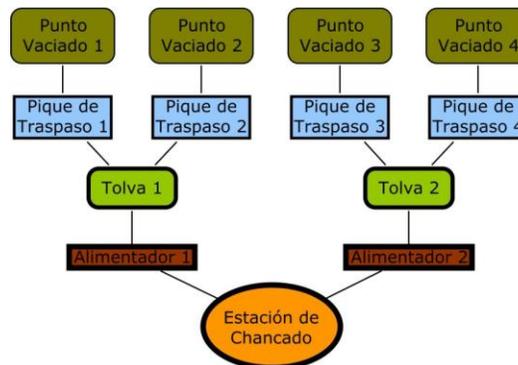


Figura 8: Modelo de bloques del nivel traspaso-chancado.

4. MODELO DE CONFIABILIDAD

4.1. Descripción del software

Como se explicó anteriormente, el software utilizado para las simulaciones corresponde a *Availability Workbench*®, el cual presenta cuatro módulos integrados:

- RCMCost (Reliability-Centered Maintenance)
- AvSim (System Availability Simulation)
- Life Cycle Cost (LCC Module)
- Weibull Sets

Para este estudio, el módulo utilizado corresponde a AvSim, el cual permite a los usuarios la realización de simulaciones de rendimiento de sistemas en conjunto, teniendo en cuenta las dependencias existentes entre los componentes individuales. El módulo AvSim se puede utilizar para investigar, por ejemplo, los cambios de diseño o las configuraciones operativas del sistema.

Para poder realizar las simulaciones, el programa necesita saber el modo de falla de los componentes del sistema de manera individual, y cómo estos se combinan con otras fallas las que pueden traducirse en reducción del rendimiento, ocasionar riesgos y cómo afectan a las capacidades operativas. Para ello es necesario construir un diagrama de confiabilidad o RBD (Reliability Block Diagram), que representa la combinación de eventos existentes dentro del sistema.

Una vez definido el RBD, se debe agregar un modo de falla a cada uno de los componentes. Dicho modo de falla, puede ser ingresado manualmente a partir de una distribución, o bien, puede ser importado desde *Weibull Sets*, que permite el ingreso de datos históricos, y el programa calcule la distribución que siguen dichos datos. También en el modo de falla, se pueden agregar las mantenciones que se incorporarán en el modelo, las cuales pueden ser:

- Mantenimiento correctiva (reparaciones)
- Mantenimiento programada
- Inspección preventiva

Para cada una de estas mantenciones, se debe ingresar el tiempo que tomará llevarla a cabo (ya sea fija o que siga cierta distribución) y los recursos que se utilizarán, en los cuales se puede especificar la cantidad total de recursos disponibles, el tiempo de llegada (o retraso) y la cantidad necesaria para la mantención. Los recursos que se pueden incluir se clasifican en:

- Trabajos (*Labor*)
- Equipos (*Equipment*)
- Repuestos (*Spares*)

Ya definido el modo de falla, con sus respectivas mantenciones, también es posible determinar las consecuencias que se generan a partir de esa falla. Por ejemplo, en el caso del modelo construido, se tiene que los puntos de extracción presentarán un modo de falla a partir de colgaduras, el cual tiene una frecuencia de ocurrencia que sigue una distribución de Weibull con 3 parámetros, el trabajo a realizar será el descuelgue del punto, utilizando como recursos el personal, coligües y explosivos, y la consecuencia que se tendrá será el punto colgado.

4.2. Construcción del modelo

4.2.1. Identificación de interferencias operacionales

Para realizar la construcción del modelo, es necesario identificar las posibles interferencias operacionales que pudiesen ocurrir a lo largo del sistema de manejo de minerales que se tiene como base.

En las siguientes tablas se presentan las distintas interferencias operacionales que se consideraron en la construcción del modelo:

Tabla 7: Eventos principales en el nivel de producción.

Bloque	ID	Tipo de falla	Descripción
Punto de extracción	1.1	Colgadura	Material en columna de extracción, que impide el libre flujo de mineral.
	1.2	Sobretamaño	Material de granulometría mayor a la cargable por el LHD en el punto de extracción.
Subcalle	2.1	Falla LHD	Falla que se presenta en el equipo de carguío por lo que no es posible el traslado del mineral.
	2.2	Carpeta	La carpeta de rodado presenta desperfectos dado el tránsito de equipos a través de ella.
	2.3	Estocadas	Fallas estructurales que se presentan en los accesos de los puntos de extracción.
	2.4	Imprevistos	Cualquier otra falla que se presente en las subcalles de producción y que no se tenga considerada en el modelo.
Parrilla	3.1	Bolones	Mineral que no fluye por las aberturas de la parrilla.
	3.2	Infraestructura	Deterioros dados por el uso de las descargas de mineral por parte de los LHD.

Tabla 8: Eventos principales en el nivel de traspaso.

Bloque	ID	Tipo de falla	Descripción
Pique	4.1	Colgadura	Material en pique trancado, que impide el libre flujo de mineral.
	4.2	Mecánica	Falla debido a problemas geotécnicos o bien detenciones por problemas con las infraestructuras mecánicas del pique
	4.3	Capacidad	Se alcanza el límite del máximo o del mínimo de capacidad recomendado para la operación de un pique de traspaso.
	4.4	Imprevisto	Cualquier otra falla que pueda presentarse en los piques de traspaso y que no se tenga considerada en el modelo.
Tolvas	5.1	Desgaste	Detención debida a la falla por la utilización y desgaste en la infraestructura de la tolva.
	5.2	Infraestructura	Falla de los componentes externos que contienen a la tolva.
	5.3	Capacidad	Se alcanza el límite del máximo o del mínimo de capacidad recomendado para la operación de la tolva.
Alimentador	6.1	Falla eléctrica	Caída del sistema de alimentación eléctrica de los alimentadores provoca la detención del flujo.
	6.2	Componentes	Daños generados en los componentes del alimentador debido a flujo de mineral.
	6.3	Imprevistos	Cualquier otra falla que pueda presentarse en los alimentadores y que no se ha considerado en el modelo.

Tabla 9: Eventos principales en el chancado y descarga.

Bloque	ID	Tipo de falla	Descripción
Chancador	7.1	Capacidad	Detención del chancador debido a que alcanza el máximo o mínimo de niveles de mineral en la cámara para su correcto funcionamiento.
	7.2	Falla eléctrica	Caída del sistema de alimentación eléctrica que provoca la detención del chancado.
	7.3	Atollos	Interrupción del flujo del mineral a través del chancador debido a la presencia de un material inchancable.
	7.4	Otros	Cualquier otra falla que pueda presentarse en los chancadores y que no se ha considerado en el modelo.
Correa	8.1	Capacidad	Detención de la correa debido a que alcanza el máximo de mineral que puede transportar.
	8.2	Falla eléctrica	Caída del sistema de alimentación eléctrica que provoca la detención de la correa.
	8.3	Componentes	Falla de los componentes de la correa, como el deterioro de una polea o polines.
	8.4	Rotura	Rotura de la cinta transportadora de mineral, en la cual se debe parchar o bien, realizar el cambio completo de ésta.

4.2.2. Recursos y trabajos a realizar

A continuación se tienen las consecuencias y las labores a realizar, como también los recursos con sus costos asociados²⁴:

Tabla 10: Consecuencias y labores para el nivel de producción.

Bloque	ID	Consecuencias	Labores
Punto de extracción	1.1	Punto colgado	Descuelgue punto
	1.2	No carga LHD	Reducción secundaria
Subcalle	2.1	Sin LHD	Espera LHD
	2.2	Camino deteriorado	Reparación calle
	2.3	Sin estocada	Reconstrucción calle
	2.4	Caída inesperada	Auxiliares calle
Parrilla	3.1	Sin descarga LHD	Reducción martillos
	3.2	Sin acceso a pique	Reconstrucción parrilla
Pique	4.1	Pique colgado	Descuelgue pique
	4.2	No operativo	Reconstrucción pique
	4.3	Stock pique	Espera nivel pique
	4.4	Caída inesperada	Auxiliares pique

Tabla 11: Consecuencias y labores para el nivel de trasaso-chancado.

Bloque	ID	Consecuencias	Labores
Tolvas	5.1	Cambio material	Recambio tolva
	5.2	Sin flujo desde pique	Reconstrucción tolva
	5.3	Stock tolva	Espera nivel tolva
Alimentador	6.1	Alimentador sin energía	Reposición energía alimentador
	6.2	Alimentador no disponible	Reconstrucción alimentador
	6.3	Caída inesperada	Auxiliares alimentador
Chancador	7.1	Stock chancador	Espera nivel chancador
	7.2	Chancador sin energía	Reposición energía chancador
	7.3	Chancador trancado	Extracción atollo
	7.4	Chancador no disponible	Reconstrucción chancador
Correa	8.1	Stock correa	Espera nivel correa
	8.2	Correa sin energía	Reposición energía correa
	8.3	Correa no disponible	Reemplazo piezas
	8.4	Correa rajada	Reemplazo o parche

²⁴ Estimados a partir de la información dada en MME – Mining and Mill Equipment Cost.

Tabla 12: Recursos utilizados en las labores de mantención y sus costos.

Stock equipos y recursos	Descripción	Costo capital [US\$]	Costo operacional [US\$/h]
Operador	Personas encargadas de las operaciones mina como descuelgue de puntos o manejo de martillos.	30.000	0,5
Personal	Personas encargadas de las reparaciones y mantenciones de los componentes del sistema.	24.000	0,5
Mecánico	Personas específicas encargadas de las reparaciones y mantenciones de los componentes del sistema.	25.000	0,5
Coligüe	Herramientas necesarias para realizar la tarea de descuelgue y destranque.	5.000	2,5
Explosivos	Insumos necesarios para realizar las labores en que se necesite tronadura.	50.000	22,14
Jumbo	Equipos utilizados para la reducción secundaria.	1.200.000	60,78
Maquinaria	Equipos utilizados para la reparación de infraestructuras y componentes de las partes del sistema.	1.500.000	105,3
Combustible	Insumo necesario para el accionar de los equipos utilizados en las reparaciones.	12.000	19,78
Martillo	Equipo utilizado para la reducción de tamaño en parrilla, ante la presencia de bolones.	500.000	10,65
Desmontador	Equipos utilizados en las reparaciones, al igual que las maquinarias.	1.800.000	95,46
Generador	Equipo utilizado para la generación de energía ante fallas eléctricas.	600.000	15,42
Herramientas	Herramientas necesarias para la mantención y reparación de todos los componentes.	50.000	35,6
Auxiliares	Equipos y herramientas utilizados en la presencia de fallas no consideradas en el modelo.	250.000	74,95

4.2.3. Inputs del modelo

Para la implementación del modelo, se utilizaron las distribuciones de probabilidad de falla²⁵ de los componentes del sistema, como las distribuciones de los tiempos en que tardan los componentes en ser reparados, los que se muestran en la siguiente tabla (en anexos se encuentran los detalles de los requerimientos de equipos y recursos para cada una de las labores de reparación, mantenimiento e inspección):

Tabla 13: Distribuciones de frecuencia de fallas.

Interferencia operacional		Fallas			
		Distribución	Eta	Beta	Gamma
Punto de extracción	Colgadura	Weibull (3P)	313,1	0,8836	4,052
	Sobretamaño	Weibull (3P)	567,2	0,9845	1,186
Subcalle	LHD	Weibull (2P)	27,15	0,9649	0
	Carpeta	Weibull (3P)	1,56E+04	1,745	-1,589
	Estocada	Weibull (2P)	8.211	1,463	0
	Imprevistos	Weibull (2P)	4.083	0,7556	0
Parrilla	Bolones	Weibull (3P)	10,86	1,311	-0,0009
	Infraestructura	Weibull (3P)	8.224	2,048	-170
Pique	Colgadura	Weibull (3P)	1,45E+04	2,936	-1353
	Mecánica	Weibull (3P)	2,29E+04	1,741	-1264
	Capacidad	Weibull (3P)	338	0,5601	0,0051
	Imprevisto	Weibull (3P)	1.629	0,868	-0,4388
Tolva	Desgaste	Weibull (3P)	2.465	0,7716	18,82
	Infraestructura	Weibull (2P)	1.625	0,5343	0
	Capacidad	Weibull (3P)	956,1	2,635	-15,86
Alimentador	Eléctrica	Weibull (3P)	265,8	0,5247	0,0122
	Componentes	Weibull (3P)	74,51	0,5556	2,42E-05
	Imprevisto	Weibull (3P)	1453	0,6909	2,41
Chancador	Capacidad	Weibull (3P)	671,5	0,903	56,59
	Eléctrica	Weibull (3P)	458,1	0,6007	-0,0031
	Atollo	Weibull (3P)	75,11	0,921	0,6978
	Otros	Weibull (3P)	194,9	0,4723	12,25
Correa	Capacidad	Weibull (3P)	134,5	0,6996	-0,00401
	Eléctrica	Weibull (3P)	335,1	0,5729	0,1796
	Componentes	Weibull (3P)	105,3	0,6106	-0,00085
	Rotura	Weibull (2P)	152,5	0,3541	-5,9E-07

²⁵ Para graficar las distribuciones se utilizó el software StatFit.

Tabla 14: Distribuciones de los tiempos de reparaciones.

Interferencia operacional		Reparaciones					
		Distribución	Eta	Beta	Gamma	Promedio	Desv. Estándar
Punto de extracción	Colgadura	Normal	-	-	-	1	0,3
	Sobretamaño	Normal	-	-	-	0,8	0,25
Subcalle	LHD	Lognormal	-	-	-	3	1,5
	Carpeta	Lognormal	-	-	-	120	15,4
	Estocada	Normal	-	-	-	72	10
	Imprevistos	Normal	-	-	-	20	5
Parrilla	Bolones	Normal	-	-	-	0,6	0,15
	Infraestructura	Lognormal	-	-	-	100	50
Pique	Colgadura	Weibull	10,74	2	0	-	-
	Mecánica	Weibull	5,458	3,523	15,23	-	-
	Capacidad	Weibull	1,71	1,89	1,23	-	-
	Imprevisto	Lognormal	-	-	-	18	3,2
Tolva	Desgaste	Lognormal	-	-	-	20	4,85
	Infraestructura	Normal	-	-	-	90	15
	Capacidad	Weibull	1,921	0,9853	0,007301	-	-
Alimentador	Eléctrica	Weibull	1,783	0,5532	0,089	-	-
	Componentes	Weibull	5,223	0,8646	0,2404	-	-
	Imprevisto	Normal	-	-	-	36	8
Chancador	Capacidad	Weibull	0,8268	1,019	7,08E-05	-	-
	Eléctrica	Weibull	2,403	0,7152	0,09701	-	-
	Atollo	Weibull	2	0,8198	0,06439	-	-
	Otros	Weibull	2,066	0,4723	0,17	-	-
Correa	Capacidad	Weibull	0,9699	0,8344	0,09039	-	-
	Eléctrica	Weibull	1,492	0,8261	0,05768	-	-
	Componentes	Weibull	4,176	0,9649	0,2642	-	-
	Rotura	Weibull	7,816	1,018	0,2263	-	-

Tabla 15: Detalle de frecuencias y duraciones de mantenencias e inspecciones.

Interferencia operacional		Mantención		Inspección	
		Frecuencia [h]	Duración [h]	Frecuencia [h]	Duración [h]
Punto de extracción	Colgadura	-	-	600	0,3
	Sobretamaño	-	-	800	0,3
Subcalle	LHD	80	1,5	40	0,5
	Carpeta	10.800	60	6.480	4
	Estocada	5.760	30	4.320	2
	Imprevistos	5.400	10	1.200	1
Parrilla	Bolones	-	-	-	-
	Infraestructura	6.120	50	3.000	2
Pique	Colgadura	-	-	-	-
	Mecánica	5.760	5,458	4.320	0,8
	Capacidad	-	-	-	-
	Imprevisto	1.500	8	1.300	2
Tolva	Desgaste	2.400	12	1.800	8
	Infraestructura	4.000	40	3.800	5
	Capacidad	-	-	-	-
Alimentador	Eléctrica	-	-	-	-
	Componentes	400	5,223	350	1
	Imprevisto	1.800	20	1.300	4
Chancador	Capacidad	-	-	-	-
	Eléctrica	-	-	-	-
	Atollo	-	-	-	-
	Otros	400	2,66	300	0,5
Correa	Capacidad	-	-	-	-
	Eléctrica	-	-	-	-
	Componentes	600	4,176	400	0,5
	Rotura	7.000	7,816	6.000	2

4.2.4. Criterios generales de la simulación

Una vez construido el modelo, es necesario definir las siguientes condiciones y parámetros que se considerarán para las simulaciones:

- Duración de la simulación: 7.200 horas (1 año de producción).
- Réplicas por escenarios: 1.000 réplicas.

También, es importante destacar que el modelo se basa en un macrobloque en particular del nivel 1841, el cual corresponde al macrobloque N5-1. Dicho macrobloque consta de 36 puntos de extracción por calle, abarcando un área de hundimiento de 39.080 [m²], cuya tasa de extracción planificada fluctúa entre 0,6 a 0,8 [ton/m² día] en régimen. En propagación dicha tasa planificada es de 0,2 a 0,4 [ton/m² día].

El macrobloque modelado (N5-1) tiene un total de 144 puntos de extracción distribuidos en 4 calles con 36 puntos de extracción por calle. Cada calle está dividida en dos mitades (subcalles) con 18 puntos de extracción cada una. El mineral se saca de los puntos de extracción y es trasladado por equipos LHD hacia las parrillas, para que luego el mineral fluya a través del pique de traspaso. Por lo tanto el modelo consta con 8 subcalles, 8 parrillas y 8 piques.

Una vez que el mineral se encuentra en el pique es descargado en tolvas de almacenamiento, en las que se reúne el mineral de dos piques ubicados en distintas calles. En consecuencia se tiene 4 tolvas de donde el mineral es descargado hacia un chancador mediante un alimentador desde cada tolva, con lo que reúne el mineral de las 4 calles de producción. El producto chancado, pasa a una correa transportadora donde se junta el mineral proveniente de ambos subsectores del macrobloque. En consecuencia el modelo fue construido con 4 tolvas, 4 alimentadores, 2 chancadores y 1 correa.

Los escenarios a simular corresponden a los siguientes:

- Variación del criterio de ingreso de cuadrilla a la reparación de puntos de extracción:
 - 3 a 6 puntos fallados (PE1)
 - 7 a 10 puntos fallados (PE2)
 - 11 a 15 puntos fallados (PE3)
- Escenarios con/sin mantenciones programadas e inspecciones preventivas (CMI – SMI)
- Cantidad de equipos y recursos disponibles para las labores de reparación y mantención:
 - Conservador (ER1)
 - Medio (ER2)
 - Abundante (ER3)

Tabla 16: Detalles del stock de equipos y recursos para cada escenario.

Stock equipos y recursos	Conservador	Normal	Abundante
Operador	10	20	30
Personal	15	24	36
Mecánico	3	6	9
Coligüe	5	10	15
Explosivos	3	6	9
Jumbo	2	4	6
Maquinaria	1	2	3
Combustible	6	12	18
Martillo	3	6	9
Desmontador	1	2	3
Generador	4	8	12
Herramientas	16	32	48
Auxiliares	12	24	36

Lo que al combinar los distintos criterios y parámetros mencionados, se tiene un total de 18 escenarios a simular.

Dentro de los resultados que se podrán apreciar con el software empleado se encuentran los siguientes:

- Disponibilidad esperada del sistema y de sus componentes.
- Tiempo total y cantidad de fallas de componentes.
- Tiempo empleado en reparaciones, mantenciones e inspecciones para cada una de las consecuencias y labores.
- Cantidad de veces que se repara, mantiene e inspecciona a partir de las consecuencias y labores.
- Tiempo de utilización de los equipos y recursos en labores de reparación, mantención e inspección y la cantidad de veces que fueron utilizados.

4.3. Calibración y verificación del modelo

Para la construcción del modelo, se debe entender la lógica que utiliza el software ocupado para la correcta programación. A continuación se presenta la explicación de cada una de las partes de la programación:

4.3.1. Puntos de extracción

Para el correcto funcionamiento y la compilación del modelo a construir, es necesario que se cuente con un nodo de entrada y de salida en las partes. Por ello es que se cuenta con un nodo inicial el que técnicamente podría representar al mineral que se

encuentra hundido. De dicho nodo es que salen todas las entradas de mineral al sistema, es decir, a los 144 puntos de extracción que están considerados en el modelo.

Luego se tiene el nodo de entrada, lo que vendría a ser el flujo de mineral hacia el punto de extracción. Una vez ahí, el software siguiendo la distribución asignada para cada modo de falla y mediante la generación de variables aleatorias, evalúa la existencia de colgadura en el punto. Si la respuesta a esta interrogante es “sí”, entonces el punto de extracción quedará en la condición de “Componente fallado” o bien, fuera de servicio. Por otro lado, si la respuesta es “no”, entonces evalúa la existencia de algún sobretamaño y al igual que en el caso anterior si la respuesta es afirmativa entonces el punto de extracción quedará inhabilitado y si la respuesta es negativa, entonces el punto quedará como “Componente sin falla”.

Evalutados los dos modos de falla, el nodo de salida indica la condición en que se encuentra en punto, llevándolo en el caso de una faena es como instalar una barrera señalando que el punto no se encuentra operativo. Luego, una vez que se cumplan las condiciones del criterio de ingreso de cuadrilla y además que se cuente con los equipos y recursos disponibles para ya sea la tarea de descuelgue del punto, o bien, de reducción secundaria, es que se pausa la extracción de mineral de los puntos que coexisten en la misma subcalles, ya que como es sabido, mientras se realizan dichas labores no deben haber equipos de producción funcionando (esencialmente por tráfico de personal que se realiza para la reparación y equipos LHD que transitan durante la operación). En la Figura 9 se puede apreciar un esquema del discernimiento que realiza el software con respecto a los puntos de extracción.

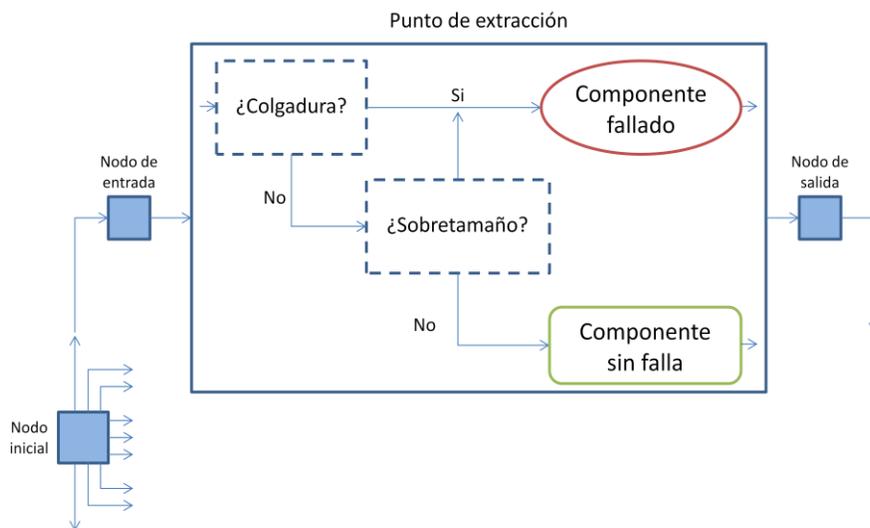


Figura 9: Lógica en el software para los puntos de extracción.

De acuerdo al modo de falla que presente el punto de extracción y utilizando las reglas que permite ingresar el software es que se tiene que los modos de falla son excluyentes, es decir, el punto va a fallar por una u otra condición y no es posible que en

determinado momento el punto presente ambas fallas. Explícitamente en el software se impone la condición “Si el Pext X está fuera de servicio, entonces no está operativo”, por lo que dicho de otra forma, si no está operativo entonces no podrá presentar otros modos de falla. También se agregó la regla de “Si Pext Y está en servicio, entonces no está disponible para mantención”, dando la condición del criterio de ingreso de cuadrilla, que se complementa con la condición que se impone en las subcalles.

4.3.2. Subcalles de producción

Una vez que ya se evaluaron los puntos de extracción, entonces se tiene el nodo de entrada a la subcalle. Dicho nodo reúne la información de 18 puntos de extracción, los que corresponden a los puntos considerados en el modelo que componen la producción de una subcalle. Es aquí en donde se incorpora el criterio de ingreso de cuadrilla que se complementa con la condición impuesta en los puntos de extracción, ya que como se ve en la Figura 10, en el nodo de entrada aparece un signo “?” lo que significa que para los escenarios evaluados es posible ingresar cuanta es la cantidad mínima de nodos entrantes que deben estar operativos para que el sistema no falle (recordando que si se tiene un modelo sin esta condición, bastará con que exista un solo punto de extracción para que el sistema no falle, es decir, la cuadrilla de reparación ingresará sólo cuando estén todos los puntos de una subcalle fuera de servicio).

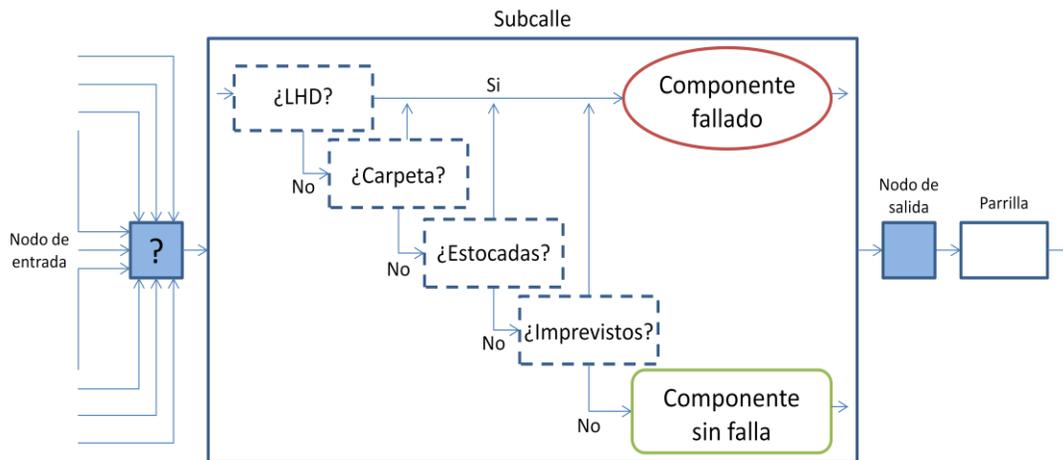


Figura 10: Lógica en el software para las subcalles.

Como se aprecia en la figura anterior, al igual que los puntos de extracción, el software evalúa la existencia de fallas por LHD, de fallas en la carpeta, en las estocadas o imprevistos. Ante la existencia de cualquiera de éstas, entonces la subcalle quedará fuera de servicio y si no, la subcalle seguirá operativa. También se impone la condición exclusividad de modo de falla, es decir, no pueden producir simultáneamente dos o más modos de fallas para una misma subcalle.

4.3.3. Parrillas de reducción

Una vez que es evaluada la subcalle, el siguiente componente que incluyó en el modelo fueron las parrillas en donde los martillos móviles realizan la reducción de las colpas antes de que pasen al pique de traspaso. Para las parrillas se consideraron dos tipos de interferencias operacionales que afectarían al flujo de mineral, los bolones y la falla de infraestructura.

Llevándolo al caso operacional, se tiene que el nodo inicial indicará que el LHD pudo descargar el mineral sin problemas en la parrilla, sin embargo, ya el mineral en la parrilla el software evalúa la presencia de un bolón que no haya fluido normalmente al pique. Dadas las consideraciones que se tienen en el diseño de Chuquicamata Subterránea, a través de la parrilla pasarán rocas hasta $0,77 \text{ [m}^3\text{]}$ ($1,3 \text{ [m]}$ de longitud admisible).

Si se detecta la presencia de un bolón, entonces quedará como “Componente fallado”, en caso contrario, se evalúa la falla de las infraestructuras relacionadas, por ejemplo el deterioro del material que recibe el mineral o el lugar en que se construyó la parrilla. De ser negativa la respuesta de la presencia de interferencias por ambos modos, entonces la parrilla se presenta como “Componente sin falla”, por lo que el mineral pudo seguir su flujo con total normal. En la Figura 11 se ilustra la lógica que sigue el software en las parrillas.

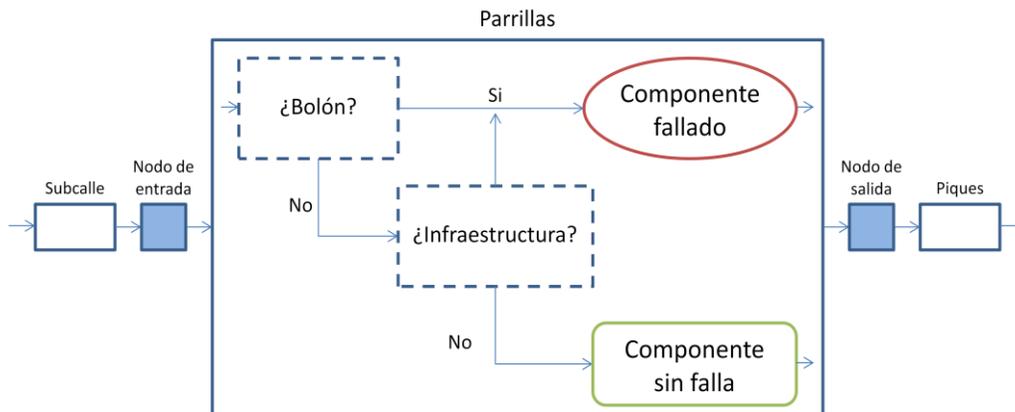


Figura 11: Lógica en el software para las parrillas.

Como proyección de la fragmentación del mineral, se tiene que aproximadamente el 10% del tonelaje producido debe ser reducido en el punto de extracción (sobretamaño) y el 7% debe reducirse en el punto de vaciado (bolón).

4.3.4. Piques de traspaso

El nodo de entrada para los piques de traspaso indica que el mineral se descargó sin problemas operacionales. Siguiendo la misma lógica que los componentes anteriores, se evalúa la ocurrencia de los distintos eventos que pueden ocurrir, para el caso de los piques

se consideraron 4 modos de falla correspondientes a colgaduras, fallas mecánicas, límite de capacidad tanto mínima como máxima que por lo general varía entre el 30% y al 90% del volumen total del pique y también evalúa algún otro imprevisto que no se esté considerado. Es importante destacar que las dimensiones de los piques de traspaso tienen un diámetro de 3,5 metros y una longitud de 70 metros, con lo que cada pique puede almacenar hasta 1.050 toneladas, es decir, 8.400 toneladas por macrobloque.

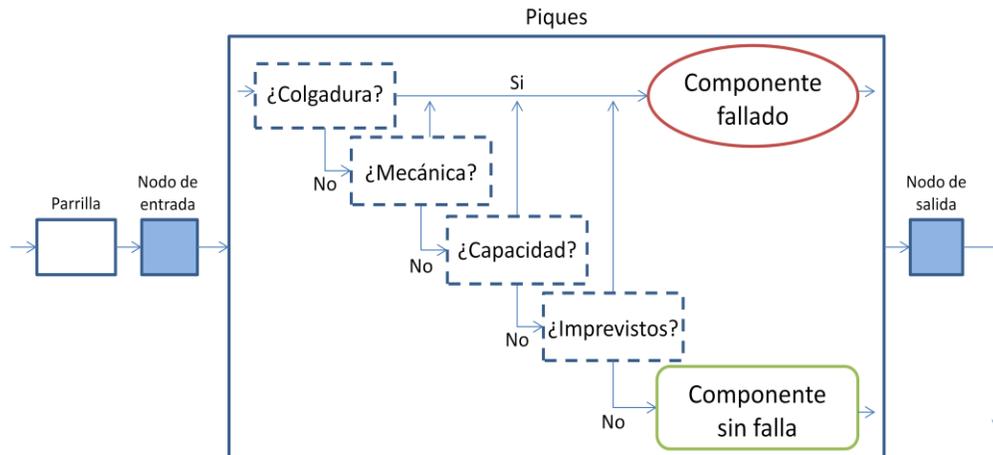


Figura 12: Lógica en el software para los piques.

Ya evaluadas los tres componentes en serie que se encuentran relacionadas (subcalle – parrilla – pique), el nodo de salida indicará la presencia de falla o no falla en los componentes. Para la programación no se utilizó la dependencia entre ellos como se hizo en los puntos de extracción ya que, al encontrarse conectados en serie, si falla uno de los 3 componentes, provocará que automáticamente los otros dos componentes queden inhabilitados para la producción (por ejemplo, si falla la parrilla, se detiene la descarga de LHD en ese punto, y se detiene el flujo de mineral hacia el pique).

El modelo considera, así como para los puntos de extracción un 1% de capacidad operacional, para los tres siguientes componentes del sistema (subcalles – parrillas – piques) un 20% de capacidad operacional, es decir, teniendo 5 de las 8 subcalles de producción operativas se alcanzará el 100% de capacidad. El concepto de capacidad operacional se refiere al “aporte” que realiza cada componente en paralelo para alcanzar la producción deseada. Por lo general, los diseños de infraestructura y equipos se encuentran sobredimensionados, por ello, se modela que 100 de los 144 puntos de extracción serán necesarios para cumplir las metas productivas y 5 de las 8 subcalles, parrillas y piques (en el caso de que el sistema siempre se encuentre disponible, se tendría un 144% para los piques y 160% para los demás componentes explicados hasta este punto, debido al sobredimensionamiento que se comentó).

4.3.5. Tolvas de almacenamiento

El nodo inicial de las tolvas reúne la descarga de dos piques de traspaso. Una vez ahí, se sigue la lógica de los componentes mencionados, se evalúa si es que la tolva presenta falla por desgaste, un imprevisto o capacidad. En la Figura 13 se muestra la lógica del software en las tolvas.

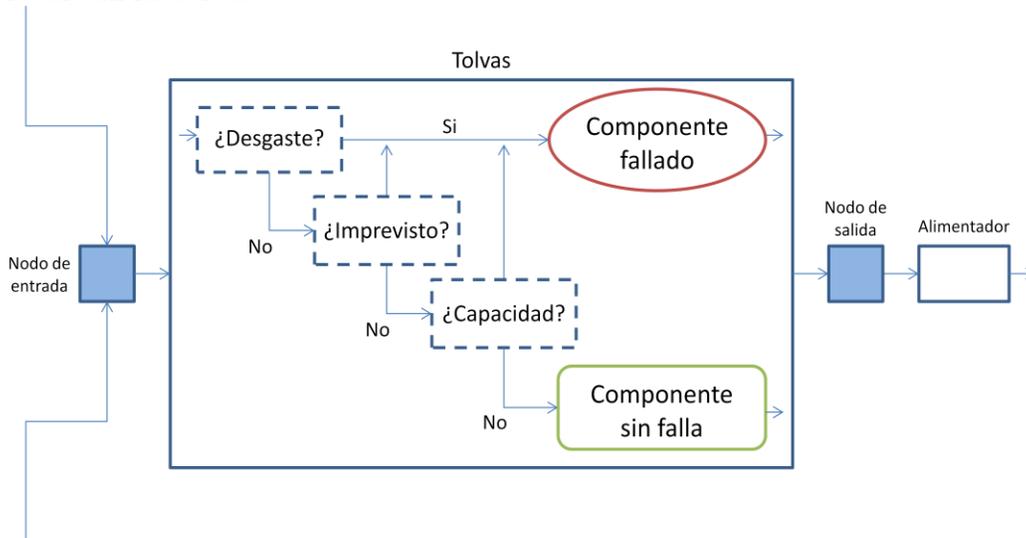


Figura 13: Lógica en el software para las tolvas.

4.3.6. Alimentadores

Los alimentadores reciben el mineral proveniente de las tolvas. En dicho componente se analiza la posibilidad de falla dependiendo de la existencia de algún desperfecto eléctrico que pudiese presentarse, o bien las fallas de componentes como por ejemplo las poleas, cabezales o revestimiento. También se consideran las fallas por imprevistos que pudiesen presentarse en los alimentadores.

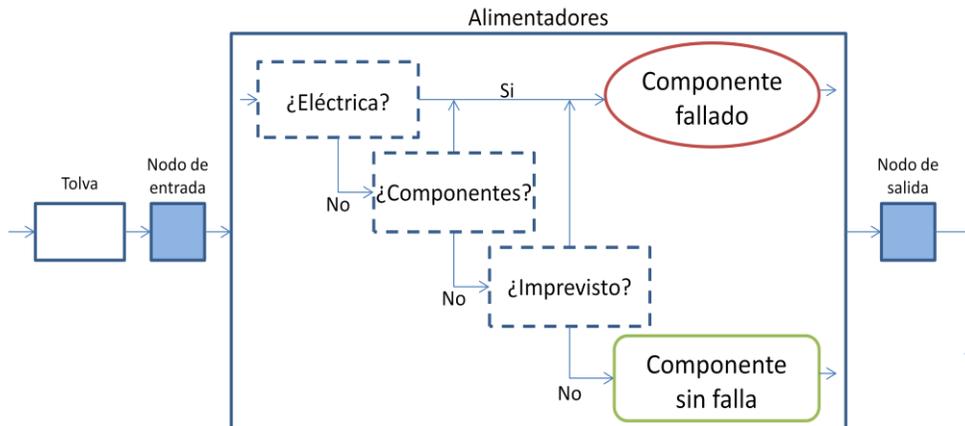


Figura 14: Lógica en el software para los alimentadores.

La programación de las tolvas y alimentadores se realiza de manera similar a los componentes anteriores, sin embargo se consideró un 40% de la capacidad operacional. Para alcanzar el 100% se necesita que estén operativos entre 2 a 3 sistemas de tolvas con alimentadores, debido al sobredimensionamiento de infraestructuras y equipos que se explicó anteriormente en la sección 4.3.4 (si se tuvieran las tolvas y alimentadores siempre disponibles se podría procesar hasta un 160% de la producción esperada).

4.3.7. Chancadores

Dos líneas de descarga de tolva – alimentador llevan el material a un chancador de mandíbulas, en donde el nodo de entrada indica la recepción del mineral proveniente de ambas líneas.

Una vez el chancador, se evalúan los distintos modos de fallas considerados en el modelo. Se analiza la detención del chancador por la capacidad de procesamiento diseñado el cual contempla que puede procesar hasta 800 [tph] con una granulometría máxima de entrada de 1,3 [m] y con un tamaño máximo de salida de 12 pulgadas. Se evalúan también la existencia de alguna falla en el sistema de alimentación energética.

Durante el proceso de traspaso de mineral, pueden caer distintos tipos de materiales que no pueden ser procesados por el chancador, como lo son distintos tipos de metales, o materiales provenientes de equipos o estructuras que se han deteriorado. Dichos materiales son conocidos como “inchancables” que producen que el chancador se atasque o se atore, por ello que un modo de falla considerado son los atollos. Un último modo de falla considerado para el chancado es el denominado “otros” en donde se pueden considerar las fallas por componentes, fallas mecánicas u otras que no consideren la capacidad, la eléctricas o los atollos.

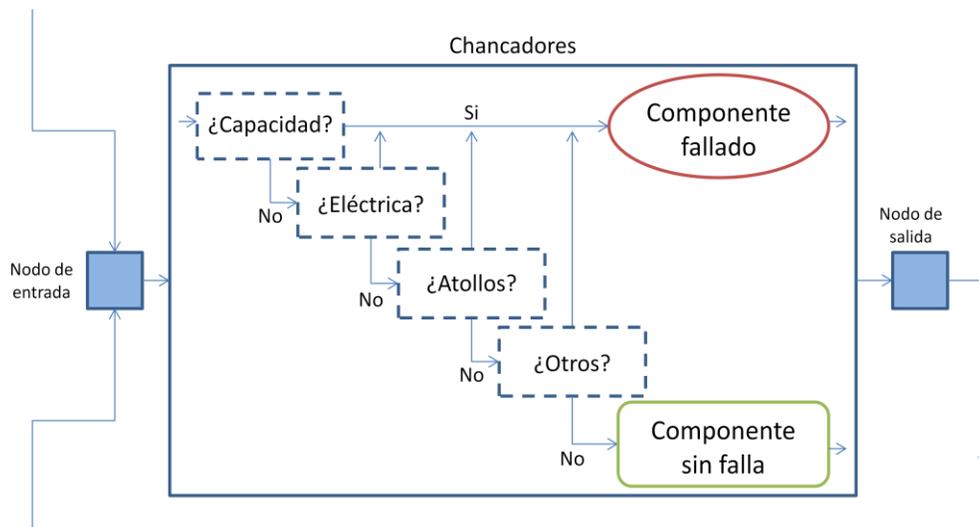


Figura 15: Lógica en el software para los chancadores.

A los chancadores se le asignó un 75% de capacidad operacional, dado que por lo general cada uno procesará el 50%, pero cuando uno esté fuera de servicio entonces uno procesará más de la mitad de la producción (considerando ambos chancadores en un caso ideal se tendría hasta un 150% de la capacidad operacional).

4.3.8. Correa

Finalmente, en el modelo se consideró la descarga de dos chancadores en una correa transportadora, llamada “correa intermedia” la cual reúne y transporta todo el mineral proveniente de un macrobloque.

El software evalúa las ocurrencias de fallas de capacidad, fallas eléctricas, fallas de componentes o bien la rotura de la correa. El diseño de la mina contempla que, dependiendo del macrobloque, la correa medirá entre 360 a 740 metros de longitud y tendrá una capacidad que varía entre 1.000 a 4.000 [tph], definiéndose un ancho de cinta de 48” a 60”.

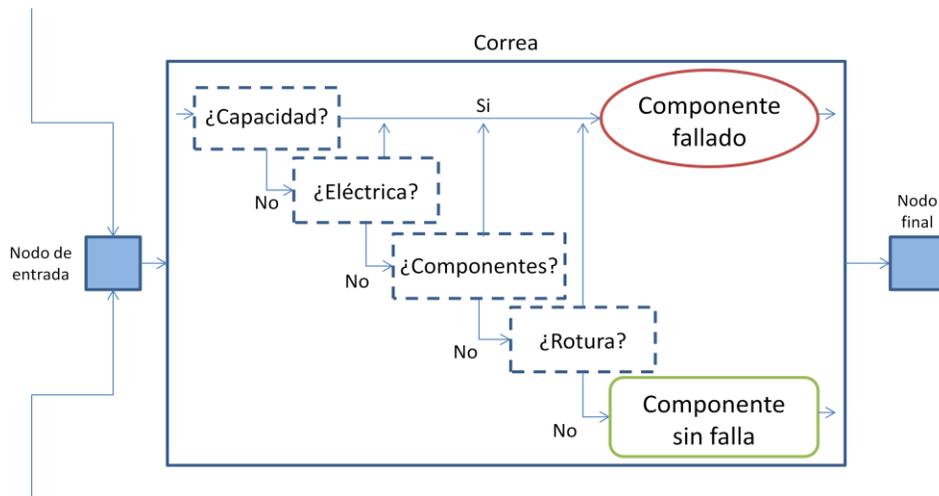


Figura 16: Lógica en el software para la correa.

El nodo final indica la salida del mineral del macrobloque el que posteriormente será transportado por distintas series de correas y almacenado en acopios hasta que llegue a la planta concentradora, los cuales no están considerados dentro de los alcances del trabajo.

Es importante destacar que se asignó un 100% de capacidad productiva a la correa ya que todo el mineral será procesado por ésta y además no existe otra “alternativa”, por lo que la caída por falla afecta directamente a la disponibilidad del macrobloque.

5. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

Lo primero que se debe considerar, dependiendo de las condiciones de cada escenario, es cuál fue la disponibilidad total del sistema. Por ello es que se ilustran los comportamientos que sigue el modelo de simulación a partir de los parámetros dados:

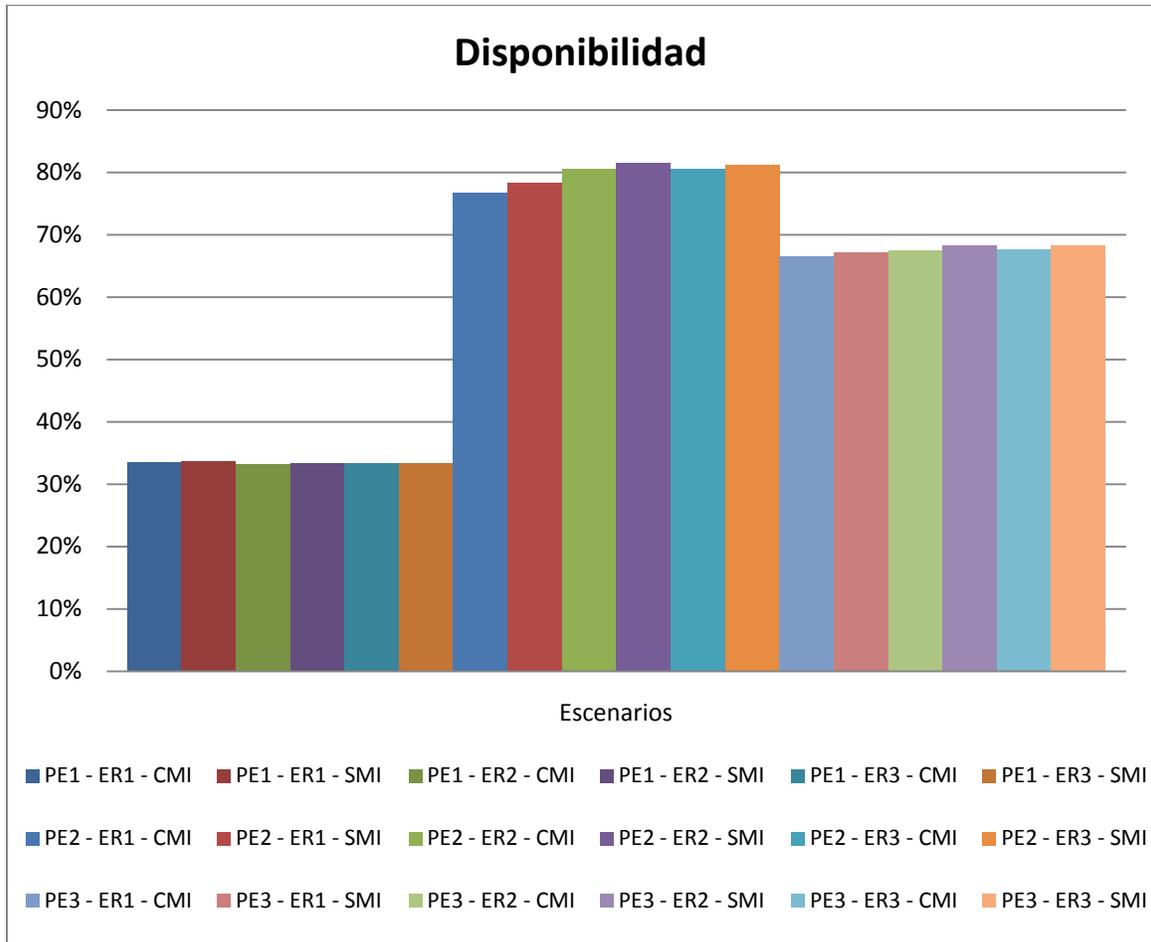


Gráfico 1: Disponibilidad según escenarios (criterio dominante: ingreso de cuadrilla).

Dados los resultados, es que se debe analizar por qué los escenarios siguen el comportamiento de “escalones”, los cuales se pueden apreciar bien definidos en el gráfico anterior. La estrategia del criterio de ingreso de cuadrilla es determinante en estos resultados.

5.1. Resultados por criterio de ingreso de reparación

Los escenarios que presentan una menor disponibilidad son aquellos que tienen como criterio de ingreso de cuadrilla cuando existan pocos puntos de extracción fallados, es decir, la mayor cantidad del tiempo se encuentran en proceso de reparación de puntos por lo que el sistema no puede estar disponible para la producción en durante periodos

prolongados de tiempo. La cantidad de equipos y recursos no son mayormente influyentes para la definición de estos tres grupos.

Si se agrupan los tres escalones obtenidos con respecto a los 3 criterios de ingreso de reparación de puntos de extracción, para cada uno de los componentes del sistema se tiene que los promedios de las disponibilidades de los 6 escenarios para cada caso, son los siguientes:

Tabla 17: Promedio de disponibilidades de componentes por criterio de ingreso.

Puntos fallados	PE1 3 a 6	PE2 7 a 10	PE3 11 a 15
Puntos de extracción	60,26%	71,03%	57,13%
Subcalles	99,21%	98,12%	98,46%
Parrillas	99,46%	98,61%	98,90%
Piques de traspaso	99,89%	99,78%	99,81%
Tolvas	98,97%	98,35%	98,42%
Alimentadores	98,87%	97,65%	97,97%
Chancadores	97,86%	96,66%	97,24%
Correa	93,08%	82,41%	84,74%
Macrobloque	34,43%	79,85%	67,61%

Se puede apreciar que existen dos cuellos de botella que influyen directamente en la disponibilidad del macrobloque, los puntos de extracción y la correa. El resto de componentes no tiene una mayor influencia en los resultados dado que las estructuras y equipos como subcalles, parrillas, piques, tolvas, alimentadores y chancadores, presentan una alta confiabilidad, es decir, su probabilidad de falla en el tiempo es baja.

Ahora bien, analizando netamente los dos componentes que afectan directamente a la disponibilidad del sistema. Para el caso de los PE1 se tiene que la disminución de la disponibilidad del sistema se debe al tiempo empleado en las detenciones para que se realicen las reparaciones lo que se contrasta con el criterio PE3 en donde el sistema disminuye su disponibilidad debido a la espera de que los puntos sean reparados, el cual se ve representado a continuación en el Gráfico 2 y Gráfico 3. Sin embargo, para el caso de PE2, independiente de que la correa tenga una menor disponibilidad, se tiene una mayor disponibilidad de los puntos de extracción, ya que los puntos operativos no pierden demasiado tiempo en la reparación de otros puntos (Caso PE1) y que los puntos no operativos tengan que esperar demasiado para ser reparados (Caso PE3). Por lo que se puede apreciar el impacto que tienen las reparaciones, bajo un criterio que permita una mayor frecuencia de éstas, se reflejará que el sistema esté menos tiempo fuera de servicio.

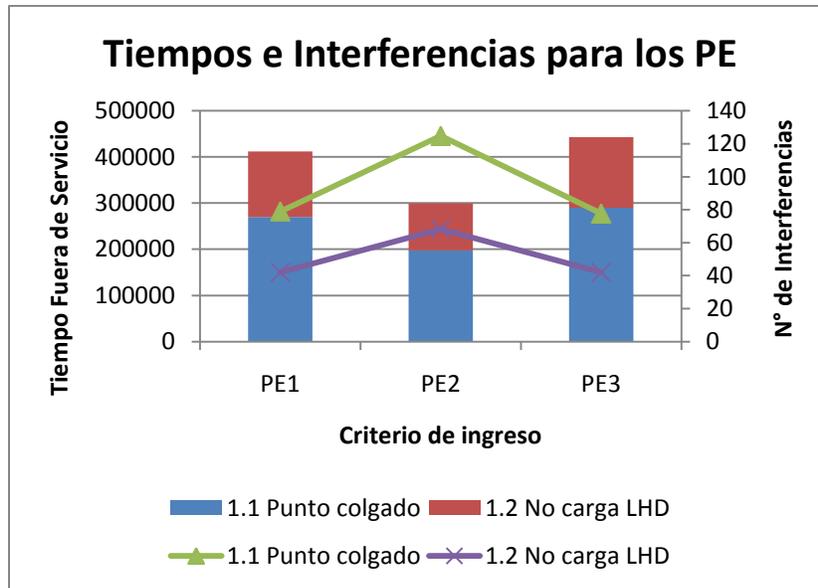


Gráfico 2: Tiempo y número de interferencias para los PE.

En el Gráfico 2 se tienen los tiempos representados por las barras, en donde se tienen la suma de las horas en que todos los puntos de extracción se encuentran fuera de servicio, desde que el punto de extracción falla por colgadura o sobretamaño (“Punto colgado” representa las colgaduras y “No carga LHD” representa los sobretamaños) y por otro lado se tiene el número de interferencias operacionales representado por las líneas.

Dichos resultados explican lo dicho anteriormente que para PE1 y PE3 se tiene una mayor cantidad de pérdidas de tiempo con respecto a PE2. PE1 significa que se entra a reparar cuando pocos puntos están sin flujo, por tanto tengo muchas intervenciones. Por otro lado, en PE3 se tienen pocas intervenciones, sin embargo el tiempo empleado en la reposición del servicio es prolongado debido a la cantidad de puntos reparados. PE2 sería el balance óptimo entre el número de ingresos versus el tiempo fuera de servicio.

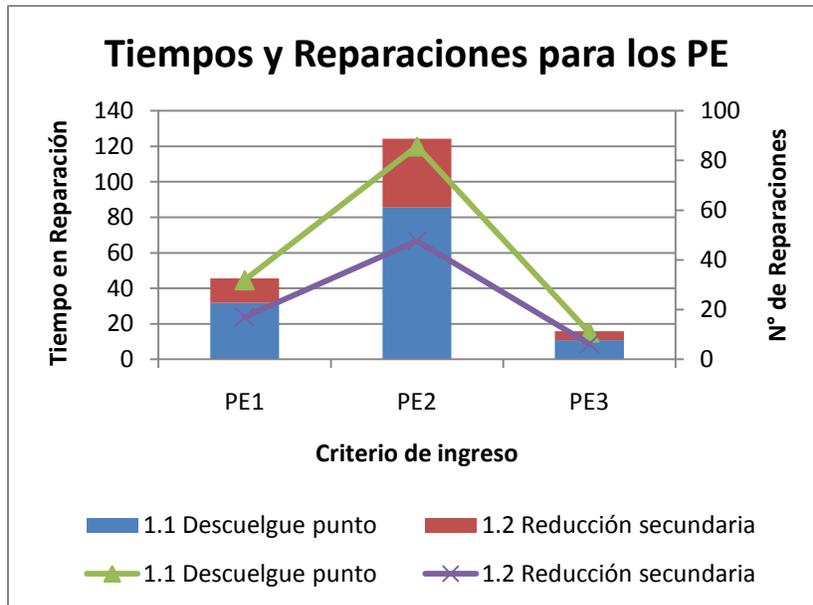


Gráfico 3: Tiempo y número de reparaciones para los PE.

Por otro lado se puede analizar los resultados de las reparaciones de la correa. Al revisar la disponibilidad en el tiempo de la Tabla 17, se evidencia que para el caso de los PE2 la correa tiene una menor disponibilidad (82,41%), mientras que para PE1 está una mayor cantidad de tiempo disponible (93,08%). Dichos resultados se explican en el Gráfico 4, en donde se puede apreciar los tiempos y las cantidades de interferencias que ocurren. Se da esta menor disponibilidad porque en estos escenarios la correa presentará un mayor tiempo de uso efectivo a partir del funcionamiento de los puntos de extracción lo que se traduce en un mayor desgaste y más fallas de la correa. Dados las distribuciones de falla y los requerimientos de equipos, se tiene que las razones más influyentes son las fallas de componentes y la rotura de correa.

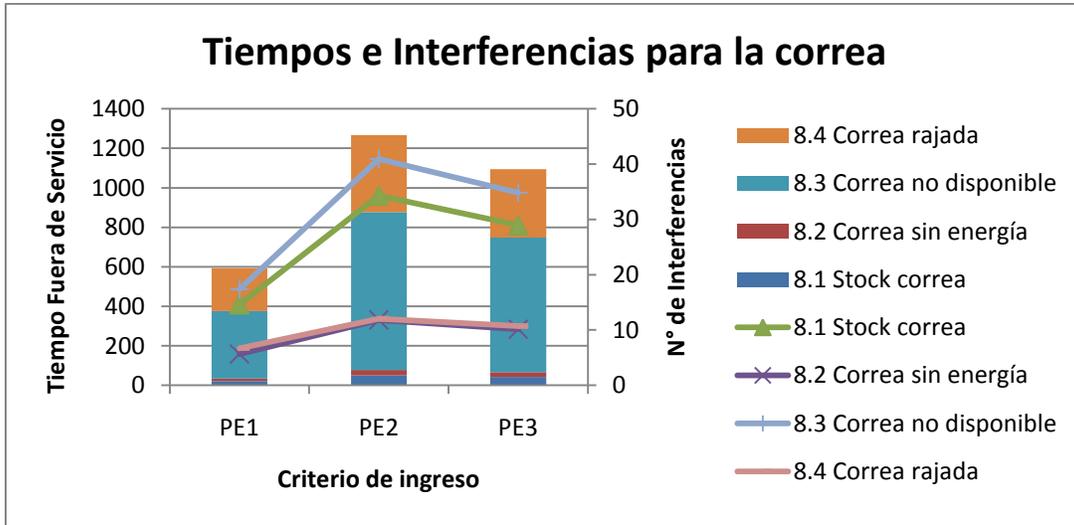


Gráfico 4: Tiempo y número de interferencias para la correa.

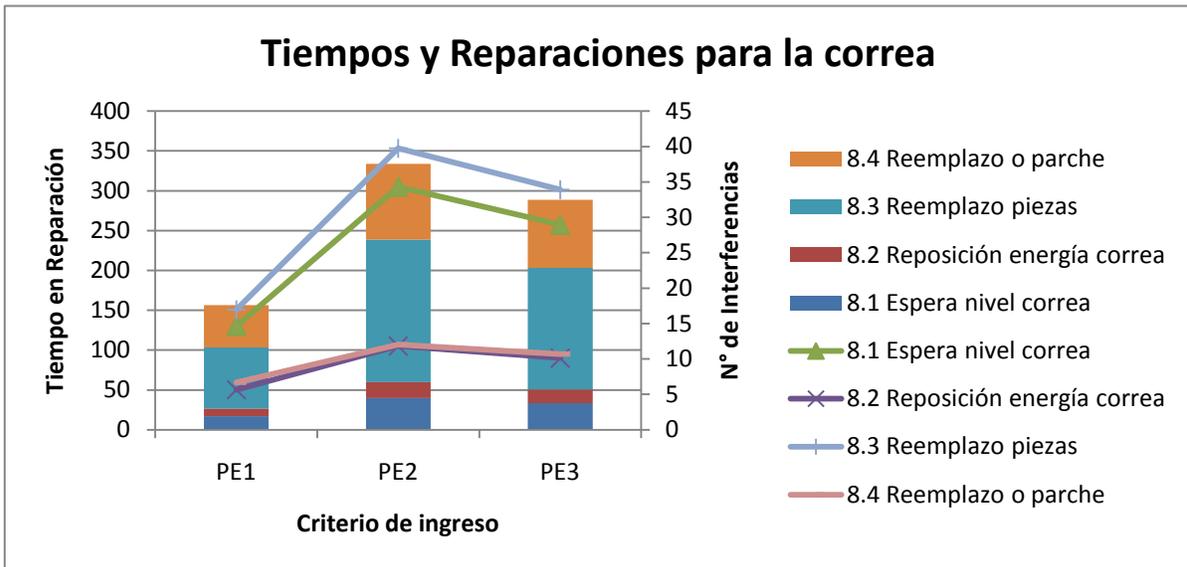


Gráfico 5: Tiempo y número de reparaciones para la correa.

Al revisar el número de interferencias ocurridas y el número de reparaciones realizadas, se puede notar una diferencia en los puntos de extracción. Por ejemplo, para el caso de PE2 el número de interferencias es alrededor de 120 y el número de reparaciones es cercano a 80. Dicha diferencia no se evidencia en la correa, ya que al mirar el Gráfico 4 y el Gráfico 5 se aprecia que el número de interferencias y reparaciones es el mismo para ambos, como ocurre en el caso de PE2 en donde el número de eventos es del orden de 40.

5.2. Resultados por cantidad de equipos y recursos disponibles

Al analizar los resultados de los escenarios con respecto a los equipos y recursos disponibles, no se consideró la diferencia existente entre los escenarios con/sin mantenencias programadas, puesto que su variación no presenta un resultado significativo para las variables evaluadas.

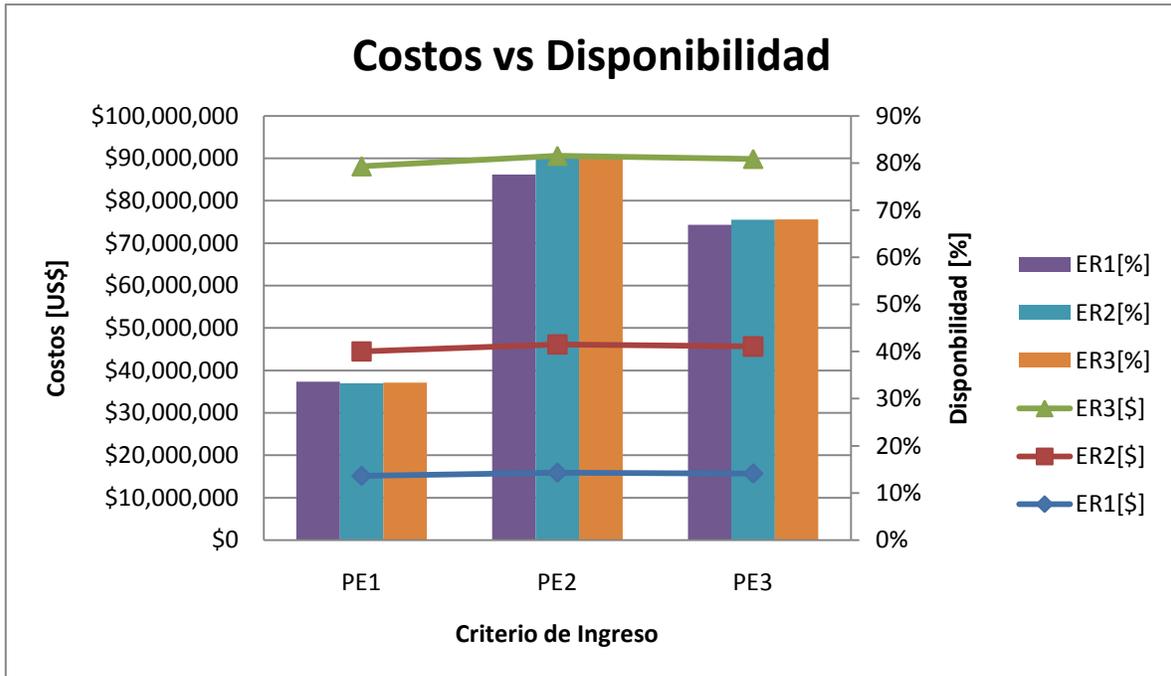


Gráfico 6: Costos versus disponibilidad.

En el Gráfico 6 se muestran las disponibilidades anteriormente explicadas, sin embargo, ahora se hace la diferencia existente entre la cantidad de equipos disponibles. Se puede apreciar que para el caso del criterio de ingreso de pocos puntos (PE1) no existe una mayor variación de la disponibilidad del sistema al tener más equipos y recursos disponibles para las reparaciones (del orden del 33%), pero si existe una gran diferencia entre los costos de la adquisición y el uso de éstos. Dichas diferencias de costos representadas por las líneas, dependen si el escenario considera una cantidad de equipos y recursos conservadora (ER1), media (ER2) o abundante (ER3).

Con respecto al criterio de ingreso de PE2, se puede ver una diferencia un poco más significativa entre las disponibilidades entre los escenarios de ER. Al aumentar la cantidad de ER1 a ER2 se ve también un aumento de disponibilidad del sistema. Sin embargo, al aumentar de ER2 a ER3, no se aprecia un aumento de la disponibilidad, es decir, a pesar de tener una mayor cantidad de equipos no necesariamente siempre se traduce en un aumento de la disponibilidad, ya que la disponibilidad se ve afectada mayormente por la diferencia de otros criterios. De acuerdo a los costos asociados se tiene que el “mejor escenario”

corresponde al PE2 – ER2, ya que en él se tienen los costos del orden de la mitad de los costos de PE2 – ER3, y la disponibilidad para ambos casos es del orden del 80%.

Finalmente, al evaluar el criterio de ingreso PE3 se tiene que entre los stocks de equipos y recursos aumenta la disponibilidad levemente, pero siempre del orden del 68%. La gran diferencia de costos, no refleja una mayor diferencia en la disponibilidad.

5.3. Resultados por uso de mantención e inspección preventiva

Para la evaluación de las diferencias existentes entre los escenarios en que se implementa una estrategia de evaluación preventiva, se estudian por separado tanto para el criterio de ingreso como para la flota de equipos y recursos disponibles. En los siguientes gráficos se tienen los resultados obtenidos, en donde “CMI” representan los escenarios en que se implementaron las mantenciones programadas e inspecciones preventivas, mientras que “SMI” representan los escenarios sin las mantenciones programadas e inspecciones:

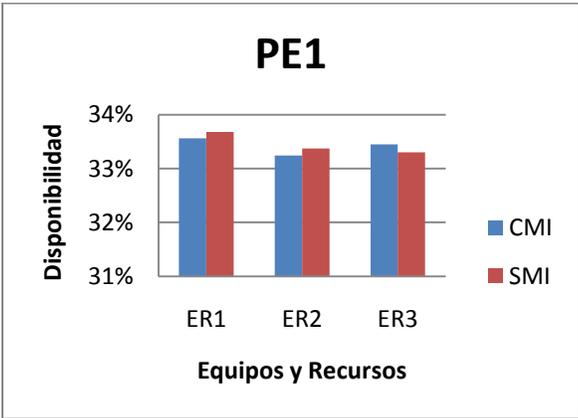


Gráfico 7: Disponibilidad para PE1.

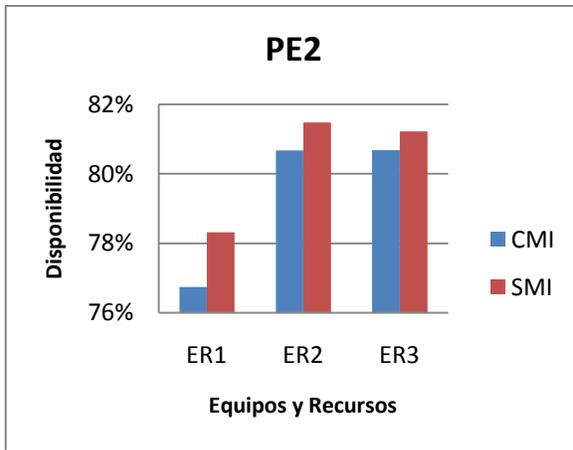


Gráfico 8: Disponibilidad para PE2.

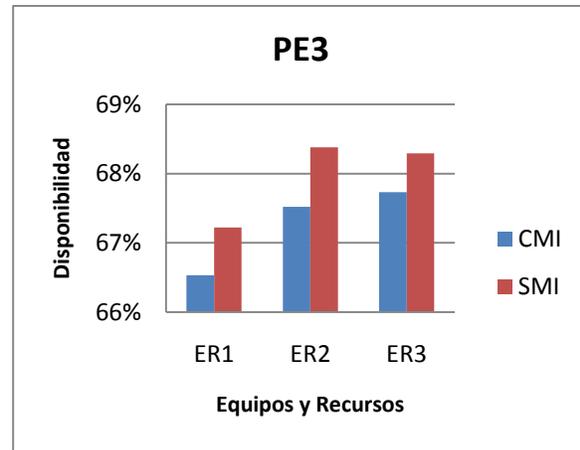


Gráfico 9: Disponibilidad para PE3.

Al implementar una estrategia de mantención preventiva se espera que el sistema obtenga una disponibilidad mayor ya que al realizar un mantenimiento e inspecciones se eviten las fallas inesperadas del sistema que involucren grandes detenciones y pérdidas de producción. Sin embargo, en los resultados se ve un efecto contrario, en que en todos los escenarios se tiene una disponibilidad mayor al no tener una estrategia preventiva con respecto a los escenarios que la implementan pues presentan una menor disponibilidad. El único escenario en que se ve el efecto esperado es para el criterio de ingreso de pocos puntos fallados y con una cantidad abundante de equipos y recursos (PE1 – ER3 – SMI vs PE1 – ER3 – CMI).

Ahora bien, el por qué de estos resultados se puede entender de varias formas. La primera es que, como se dijo anteriormente, existen dos cuellos de botellas que su no-operatividad afecta directamente a la disponibilidad del sistema, los cuales son las fallas de los puntos de extracción, y las fallas que pueda presentar la correa. Para los puntos de extracción no se incluyó una estrategia de mantención preventiva, mientras que para la correa se incluyeron mantenciones preventivas para la falla de componentes y rotura, por lo tanto se tiene que para los dos componentes más influyentes del sistema construido, no se tienen “mejoras” en los tiempos mediante las estrategias preventivas.

Para el resto de modos de falla de los componentes se tomaron estrategias de mantenciones preventivas, sin embargo la periodicidad de éstas no cumplen con el objetivo de disminuir la tasa de fallas. Para que las estrategias preventivas tengan una influencia mayor en la disponibilidad de los sistemas, es necesario un estudio más profundo de las capacidades, mantenciones, usos, datos históricos y materiales de los equipos e infraestructuras, dicho estudio de las propiedades no se encuentra dentro de los alcances del modelo de simulación construido.

5.4. Uso de equipos y recursos

Otro de los resultados que se puede obtener de la simulación es el uso que tuvieron los equipos incluido en las tareas de reparaciones, para ello nuevamente se agruparon los resultados dependiendo del criterio de ingreso de cuadrilla (PE), dado que el resto de escenarios no presentan variaciones significantes entre sí.

Como se puede ver en el Gráfico 10, sigue la tendencia de mayor utilización de equipos y recursos para los escenarios con el criterio de ingreso PE2, y con menor utilización los escenarios correspondientes al criterio PE1. Dados estos resultados, se puede concluir que, el stock de equipos y recursos no tiene mayor influencia en la disponibilidad, sino que la disponibilidad depende netamente del criterio de ingreso de cuadrilla.

Lo anterior puede verse representado en que como los componentes con mayor influencia son los puntos de extracción y la correa, y se dijo que el sistema para los casos de PE1 estaban gran cantidad de tiempo en reparaciones de puntos, en contraste con los PE3 que la pérdida de tiempo se debía a la espera de puntos fallados para el ingreso a reparar, lo lógico sería que los equipos y recursos para PE1 presentaran una mayor utilización.

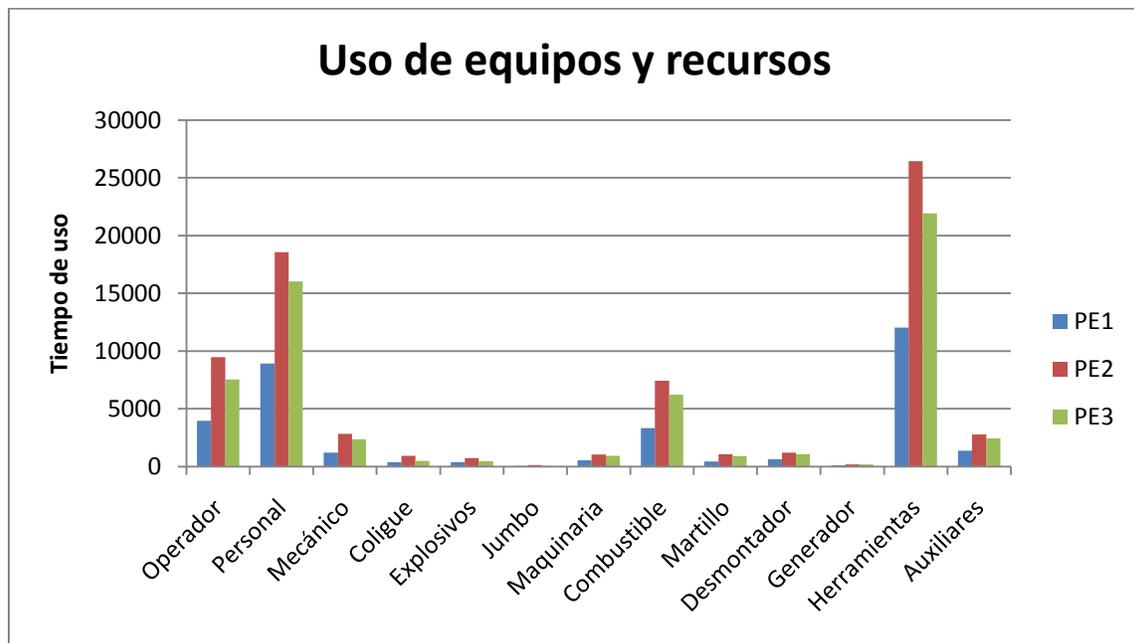


Gráfico 10: Uso de equipos y recursos según criterio de ingreso.

Sin embargo, al mirar el gráfico anterior, se puede notar que el uso que se les da a los equipos y recursos de los PE1 es menor que el resto, lo que por otro lado corrobora lo antes dicho sobre mayor pérdida de disponibilidad se debe a que al tener el criterio de pocos puntos fallados a pesar de que el tiempo de reparación es menor, pero hay muchos puntos sin falla en espera.

Ahora bien, mirando los resultados desde otra perspectiva, se tiene que los equipos y recursos más utilizados siguen la lógica de los requerimientos incluidos en cada una de las labores necesarias para las reparaciones, en donde los que tienen más uso son las herramientas, el personal, los operadores y el combustible, mientras que los con menos uso son los jumbos (utilizados solo para ciertas labores de reducción de material) y los generadores (cuyo uso es bajo dadas las bajas frecuencias de fallas eléctricas de los componentes).

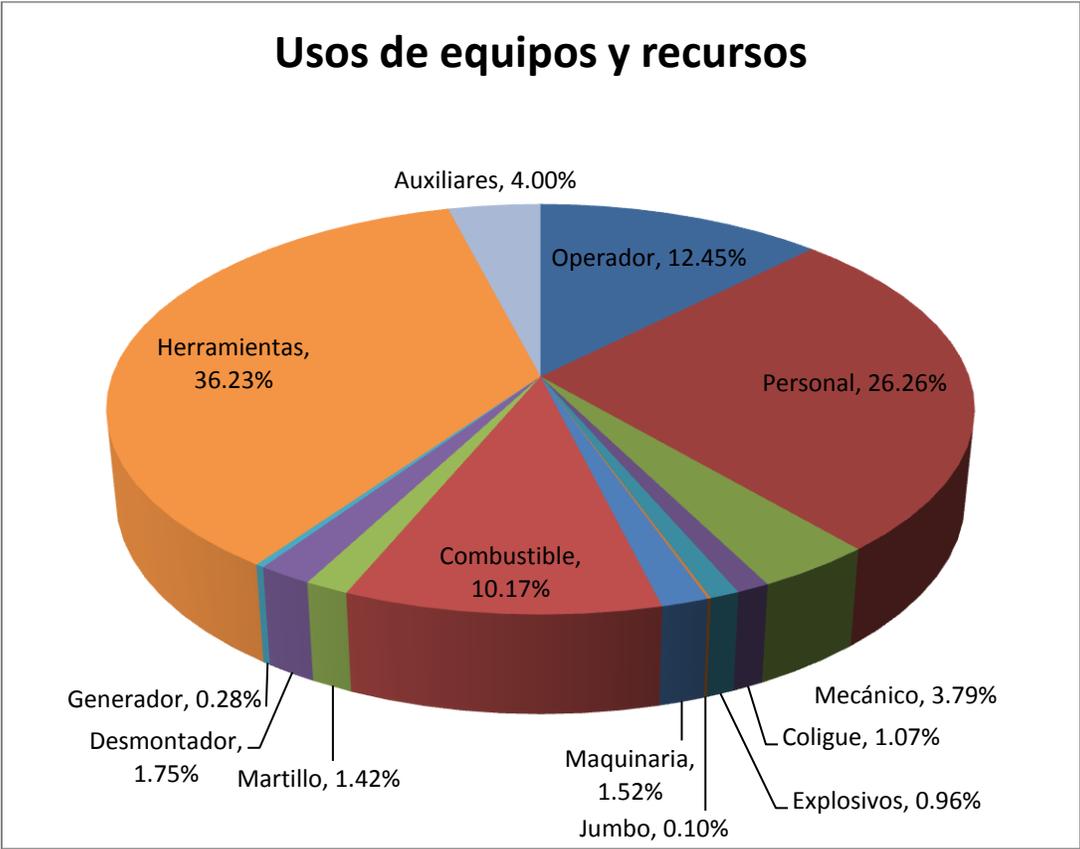


Gráfico 11: Uso porcentual de equipos y recursos.

5.5. Producción

5.5.1. Producción planificada

A continuación se muestra el plan de producción considerado para el macrobloque N5-1, en el cual se puede apreciar el tonelaje total que se extraerá por mes a partir del inicio de la producción de dicho macrobloque (enero-2024), hasta el fin de su vida útil (julio-2029).

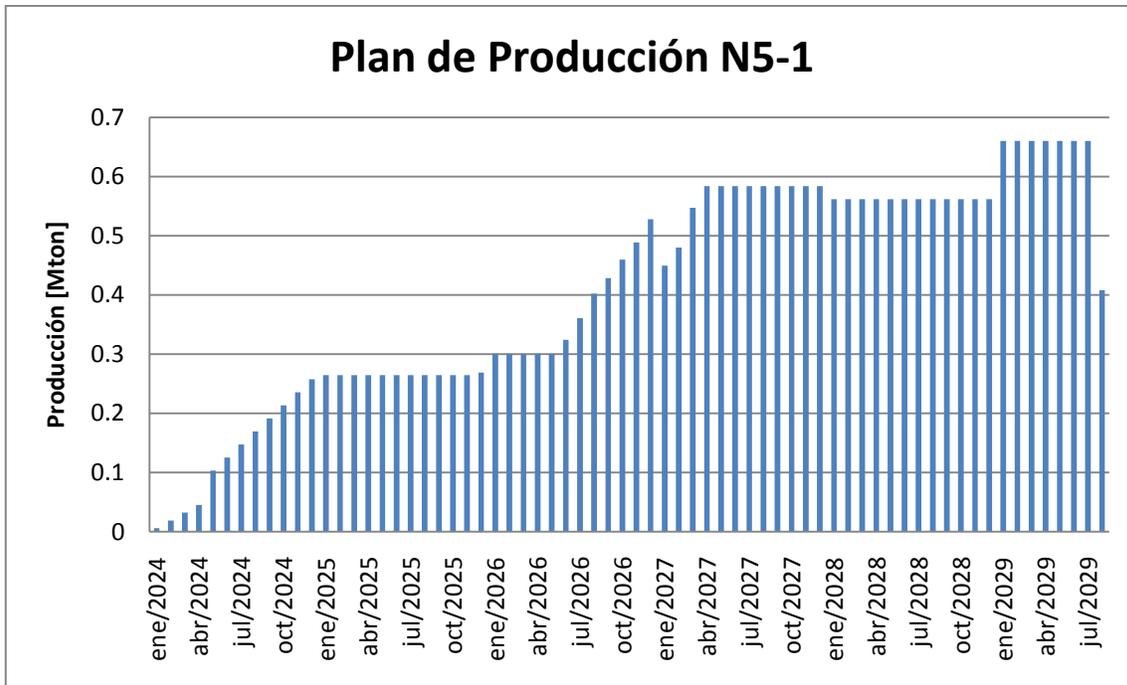


Gráfico 12: Plan de producción macrobloque N5-1.

Tomando en cuenta los datos presentados anteriormente, se utilizará una tasa de extracción en régimen a mediados del año 2027 hasta fines del año 2028, la cual fluctuó entre 0,6 a 0,8 [t/m² día].

Esta información se puede comprobar con la planificación de ingeniería básica que se tiene de Chuquicamata Subterránea, en anexos se encuentra la secuencia de extracción a partir del año 2024, en donde se puede apreciar que entre los años 2027 y 2028 se ha extraído entre el 50% y el 75% del mineral del macrobloque en estudio.

Considerando la producción que se tendrá por calle en dicho macrobloque, durante el periodo de régimen, se tiene la siguiente planificación:

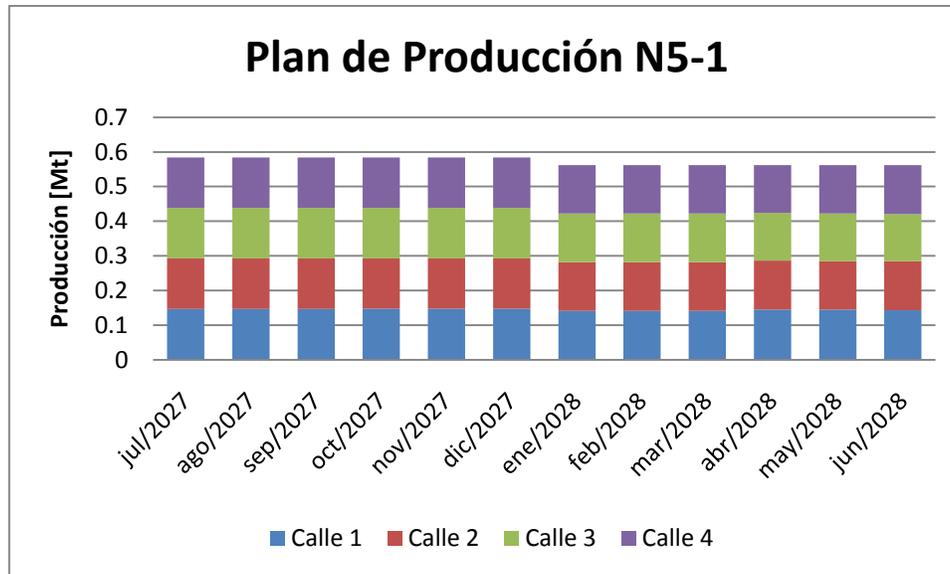


Gráfico 13: Plan de producción en régimen para las 4 calles del macrobloque N5-1.

Se tiene que en promedio se extrae por mes 572 [kt] desde el macrobloque observándose una homogeneidad en la producción por calle, lo que implica un total de 6,87 [Mt/año], correspondiendo al 13,6% de las 50,4 [Mt/año] que se planificó durante la etapa de ingeniería básica.

5.5.2. Producción según modelo de confiabilidad

Considerando la velocidad de extracción en régimen, y el área de influencia del macrobloque se puede calcular cuánto es el tonelaje máximo que podría extraer al máximo ritmo de explotación del macrobloque:

$$V_{ext} * Area = 0,75 \left[\frac{t}{m^2 \text{ dia}} \right] * 39.080 [m^2] = 29.310 \left[\frac{t}{dia} \right] = 10.550 \left[\frac{kt}{año} \right]$$

Según el modelo de confiabilidad construido, se estableció que de los 144 puntos de extracción era necesario el funcionamiento de 100 puntos de extracción para cumplir con el 100% de capacidad operacional del sistema (como se explicó anteriormente en la sección 4.3.4 de la calibración y verificación del modelo, a cada punto se le asignó un 1% de máxima capacidad operacional). Por lo tanto, para cumplir con el máximo de producción posible, se tiene que cada punto debiese procesar 105 [kt/año], siendo este el valor de toneladas que podrían extraerse si cada punto contara con un 100% de disponibilidad durante el año, a partir del cálculo realizado anteriormente que considera la velocidad de extracción y el área abierta.

A continuación se presenta el cálculo de toneladas que podría procesar el sistema, y en anexos se encuentra el detalle de cada componente (sumando el total de todos los puntos

de extracción, de todas subcalles-parrillas-piques, todas las tolvas-alimentadores, chancadores y correa).

Tabla 18: Porcentaje y tonelaje anual de las partes según el modelo de confiabilidad.

Componente	Porcentaje de capacidad	Máximo tonelaje procesable
Punto de extracción	1%	105.000
Subcalle – Parrilla – Pique	20%	2.110.000
Tolva – Alimentadores	40%	4.220.000
Chancadores	75%	7.913.000
Correa	100%	10.551.000

A partir de los siguientes parámetros, se puede calcular el rendimiento por equipo LHD:

Tabla 19: Parámetros generales.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad In Situ	2,65	[ton/m ³]
Densidad Esponjada	1,97	[ton/m ³]
Factor Conversión	0,7646	[m ³ /yd ³]
Factor de Llenado	75	[%]
Factor Operacional	79,9	[%]
Disponibilidad Mecánica	87,4	[%]
Utilización	76,2	[%]

El modelo de simulación considera la producción de 8 subcalles de producción, tomando que hay 8 LHD disponibles, sin embargo, en la realidad se tiene que la flota de LHD por macrobloque corresponde entre 5 a 6 equipos. El rendimiento aproximado de los equipos LHD por día se detalla a continuación:

Tabla 20: Parámetros de los LHD.

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad balde	9	[yd ³]
	6,9	[m ³]
Carga húmeda	10,2	[t]
Distancia media	35	[m]
Velocidad media	4,5	[km/h]
Tiempo carga + descarga + maniobra	0,88	[min]
Tiempo ciclo	1,81	[min]
Ciclos por hora	33,1	[#/h]
Producción por hora (100%)	336,2	[t/h]
Producción efectiva (con FO-DM-UT)	4.296	[t/día]

Considerando el rendimiento de los LHD y la disponibilidad de los componentes, es posible determinar cuánto es el tonelaje máximo que podría producir el sistema. A continuación se tienen las disponibilidades, los tonelajes por escenario y además el componente limitante de la capacidad máxima de producción:

Tabla 21: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE1.

Escenario			Disponibilidad [%]	Máximo tonelaje [t]	Limitante
PE1	ER1	CMI	33,56	3.052.840	LHD
PE1	ER1	SMI	33,68	3.067.180	LHD
PE1	ER2	CMI	33,24	3.036.650	Puntos de extracción
PE1	ER2	SMI	33,37	3.042.370	Puntos de extracción
PE1	ER3	CMI	33,45	2.853.090	Puntos de extracción
PE1	ER3	SMI	33,3	2.826.890	Puntos de extracción

Tabla 22: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE2.

Escenario			Disponibilidad [%]	Máximo tonelaje [t]	Limitante
PE2	ER1	CMI	76,74	6.621.970	Correa
PE2	ER1	SMI	78,32	6.826.900	Correa
PE2	ER2	CMI	80,67	6.998.540	Correa
PE2	ER2	SMI	81,48	7.118.680	Correa
PE2	ER3	CMI	80,68	7.003.670	Correa
PE2	ER3	SMI	81,22	7.095.970	Correa

Tabla 23: Disponibilidad, tonelaje procesable y limitante para escenarios PE3.

Escenario			Disponibilidad [%]	Máximo tonelaje [t]	Limitante
PE3	ER1	CMI	66,53	5.875.130	Puntos de extracción
PE3	ER1	SMI	67,22	5.960.620	Puntos de extracción
PE3	ER2	CMI	67,52	5.817.170	Puntos de extracción
PE3	ER2	SMI	68,38	5.911.830	Puntos de extracción
PE3	ER3	CMI	67,73	5.772.040	Puntos de extracción
PE3	ER3	SMI	68,29	5.876.870	Puntos de extracción

A partir de dichos resultados es que se puede establecer una relación entre la disponibilidad del sistema con la producción esperada cuyo detalle se grafica a continuación, en donde los resultados fueron agrupados según el criterio de ingreso de cuadrilla:

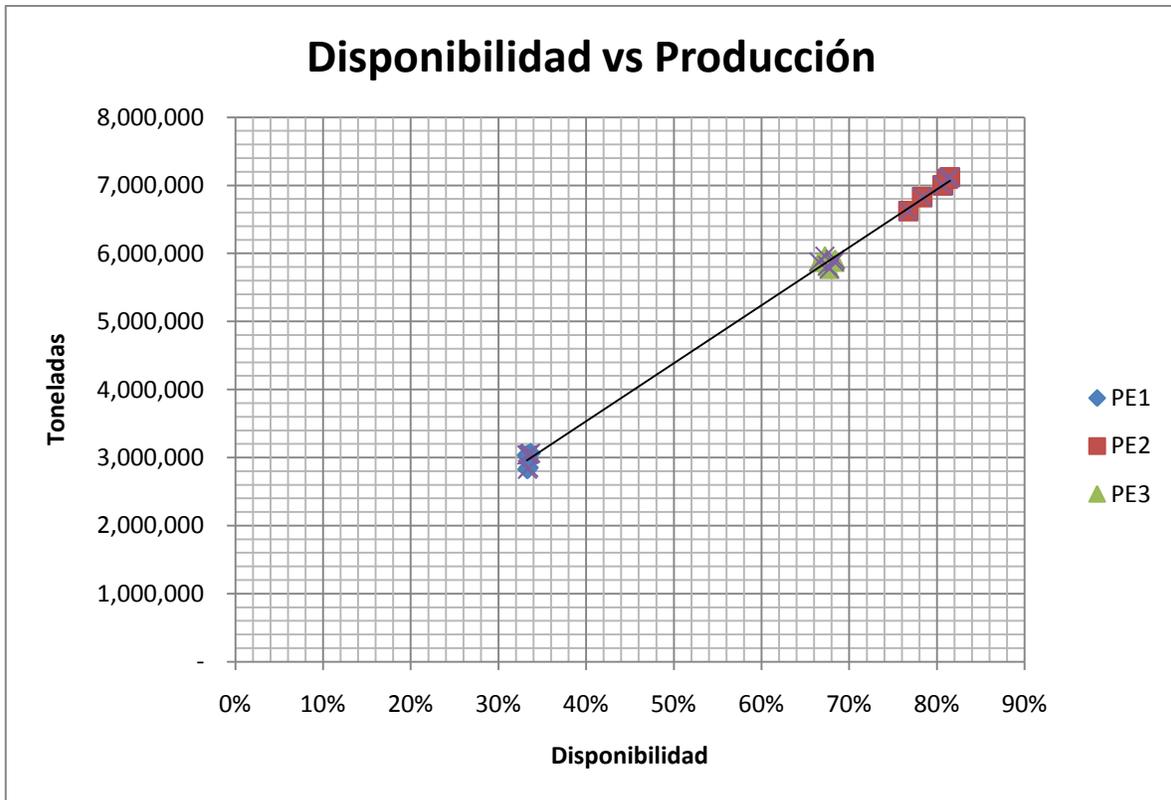


Gráfico 14: Disponibilidad versus Producción.

El escenario en que tendrá una producción más alta, como se dijo anteriormente, corresponde a los que tienen como parámetro el criterio medio de ingreso de cuadrillas (7 a 10 puntos fallados), con el stock normal a abundante de recursos, en donde se puede apreciar que al aumentar la cantidad de equipos y recursos disponibles no necesariamente implica en un aumento de la disponibilidad, es decir, solo se tendrá que existan equipos “ociosos”.

También se puede notar que, para el caso de PE1 la componente limitante de la capacidad máxima de producción es el rendimiento de los LHD con la disponibilidad de la subcalle para los escenarios con una baja cantidad de equipos y recursos (ER1), mientras que para los demás escenarios de PE1, la limitante son los puntos de extracción. Para los escenarios con criterio de ingreso PE2, la limitante de la producción es la correa ya que desde los puntos de extracción se puede producir una cantidad mayor que la capacidad máxima de correa, mientras que para los casos PE3 la limitante sólo son los puntos de extracción.

Al comparar la productividad planificada en la etapa de ingeniería básica con la productividad estimada a partir de modelo de confiabilidad, al tener una disponibilidad cercana al 80% los escenarios con criterio de ingreso entre 7 a 10 puntos fallados arrojan una capacidad productiva del orden de 7 millones, en comparación con los 6,8 millones de toneladas planificadas para el periodo evaluado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

De los resultados obtenidos, se puede concluir que dado los parámetros que se variaron, los cuales fueron: el criterio de ingreso de cuadrilla para la reparación de puntos de extracción, la cantidad de equipos y recursos disponibles para los trabajos de reparación y mantención y la utilización de una estrategia de mantención programada e inspección preventiva, el único que produce grandes diferencias con respecto a la disponibilidad es el criterio de ingreso de cuadrilla.

A su vez, los componentes que afectan directamente a la disponibilidad son las fallas de los puntos de extracción y las fallas en la correa.

Los puntos de extracción son influyentes debido su reparación paraliza todo el sistema productivo, por lo que la presencia de equipos y recursos en las calles de producción para la reparación de estos es primordial en el proceso. Por ello es que los escenarios que presentan una mayor disponibilidad son aquellos que tienen como criterio de ingreso a restablecer el flujo, una cantidad media de puntos de extracción fallados. En los escenarios que establecen pocos puntos de extracción fallados para el ingreso de cuadrillas, los puntos disponibles pierden demasiado tiempo operativo en la espera de la reparación de los pocos puntos fallados, mientras que, los escenarios que establecen muchos puntos para el ingreso de cuadrillas a repararlos, la mayor parte del tiempo la pierden estando no-operativos a la espera de ser reparados. El criterio medio es la mezcla perfecta que maximiza la disponibilidad del sistema de manejo de materiales.

Con respecto a la correa, se tiene que representa un camino único a la salida del mineral, por lo que cualquier interferencia que presente afectará directamente a la disponibilidad. Sin embargo, las fallas más comunes de las correas son de los componentes y de capacidad, esta última no depende directamente del funcionamiento de esta, sino de lo que ocurre aguas abajo en el proceso productivo. El resto de los modos de falla que fueron considerados, tienen una baja probabilidad de ocurrencia por lo que su impacto no es significativo.

Evaluando los escenarios que presentan distintas cantidades de equipos y recursos disponibles para la mantención, se tiene que si sólo se analizan los escenarios con el criterio medio de ingreso de cuadrilla (PE2), la diferencia existente entre los recursos no necesariamente implicará una mejor disponibilidad del sistema. Se observa un aumento en la disponibilidad entre el criterio de recursos escasos y recursos medios, sin embargo, al tener recursos abundantes la disponibilidad no mejora respecto de tener recursos medios. En lo que respecta a la implementación de una estrategia de mantenimiento programado e inspecciones preventivas, dadas las distribuciones de fallas y la periodicidad de las mantenciones consideradas en el modelo, no generan una mejora en el proceso productivo.

De los 18 escenarios evaluados, el que presenta la disponibilidad más alta corresponde al que considera el criterio medio de ingreso de cuadrilla (PE2), con equipos y recursos medios (ER2) y sin mantención e inspección preventiva (SMI), cuya disponibilidad es igual al 81,48%.

6.2. Recomendaciones

Anteriormente se señaló que los principales componente del sistema que afecta a la disponibilidad son los puntos de extracción, por ello es que se recomienda buscar una estrategia que permita la reparación de los puntos sin la necesidad de detener el funcionamiento de toda la calle.

Es importante, al momento de realizar los diseños de los equipos e infraestructuras, hacer simulaciones que envuelvan más allá de la producción y rendimientos de equipos. Realizar simulaciones que involucren los conceptos de disponibilidad y confiabilidad de los componentes asociados permite asimilar un comportamiento más apegado a la realidad.

La correa es la única salida del mineral proveniente del macrobloque, es por ello que es necesario implementar alguna alternativa cuando ésta se encuentre fuera de servicio.

Para evitar el deterioro anticipado de los equipos e infraestructuras es necesario implementar una estrategia de mantenciones programadas que optimice los tiempos productivos y los tiempos detenidos, de manera que así también mejore la disponibilidad del sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Boland, P. J., Proshan, F.** «The Reliability of K out of N Systems», *The Annals of Probability*, vol. 11, pp. 760-764, 1983.
- [2] **Ramakumar, R.** «Engineering Reliability. Fundamentals and Applications», *Prentice Hall*, Nueva York, EEUU, 1993.
- [3] **Kazakidis, V. N., Scoble, M.** «Planning for Flexibility in Underground Mine Production Systems», *SME Publications*, 2003.
- [4] **Chacón, J., Göpfert, H., Ovalle, A.** «Thirty year Evolution of Block Caving in Chile», *MassMin*, Santiago, 2004.
- [5] **Rubio, E., Scott, W., Dunbar, M., Hall, R.** «Reliability theory applied to block caving production scheduling», *MassMin*, Santiago, 2004.
- [6] **Bazovsky, I.** «Reliability: Theory and Practice», New Jersey, EEUU, 1961.
- [7] **Calabro, S.** «Reliability principles and practices», 1962.
- [8] **Pascual, R.** «El Arte de Mantener», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Santiago, Chile, 2005.
- [9] **Rubio, E.** «Mine Infrastructure Reliability Applied to Production Planning», *University Of British Columbia*, Vancouver, 2005.
- [10] **Prieto, P.** «Incorporación de la Confiabilidad en la Planificación Minera y en la Asignación de Equipos», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Santiago, Chile, 2007.
- [11] **Cornejo, M.** «Impacto en la Productividad del Nivel de Traspaso en la Confiabilidad de un Programa de Producción», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Santiago, Chile, 2008.
- [12] **Salamanca, F.** «Aplicación de la Redundancia Activa en la Programación de Producción de Mina Subterránea», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Santiago, Chile, 2007.
- [13] **Troncoso, S.** «Simulación del Impacto de Interferencias Operacionales para la Planificación de la Producción», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Santiago, Chile, 2006.

- [14] **Ferrada, M.** «Recuperación Pilar Oeste Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea», *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile*, 2013.
- [15] **Henley, E. J., Kumamoto, H.** «Probabilistic risk assessment: Reliability engineering, desing, and analysis», *IEEE Press, Nueva York, EEUU*, 1992.
- [16] **Hoyland, A., Rausand, M.** «System reliability theory: Models, statistical methods», *John Wiley and Sons, Nueva York, EEUU*, 1994.
- [17] **Modarres, M., Kaminskiy, M., Krivtsov, V.** «Reliability engineering and risk analysis. A practical guide», *Marcel Dekker, Nueva York, EEUU*, 1999.
- [18] **Stamatis, D. H.** «Failure mode and effect analysis. FMEA from Theory to Execution» *ASQ Quality Press, Milwaukee, EEUU*, 2003.
- [19] **IEC** «Analysis techniques for dependability-reliability block diagram methods» *IEC 1078 91, International Electrotechnical Commission, EEUU*, 1991.
- [20] **Jinhua, D., Erlang, O.** «Availability analysis through relations between failure rate and preventive maintenance under condition monitoring». *Mälardalen University. Västeras, Suecia*, 2003.
- [21] **Samset, O.** «Reliability estimation based on operating history of repairable systems» *Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Noruega*, 1988.
- [22] **Melo, R., Lara, C., Jacobo, F.** «Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería». *Instituto Mexicano del Petróleo, México*, 2009.
- [23] **Facultad de Ciencias Exactas** «Simulación Método Monte Carlo», *Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires*, 2005.
- [24] **Rodriguez, J.** «Simulación, Método de Montecarlo», *Métodos Cuantitativos Organización Industrial*, 2011.
- [25] **Palma, J.** «Clase N°9 - Simulación Montecarlo, Cátedra Simulación de Procesos Mineros», *Universidad de Chile, Santiago*, 2013.
- [26] **Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos** «Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea – Principales Decisiones», *Chile*, 2009.

- [27] **Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos** «Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea – Criterios Específicos de Diseño», Chile, 2009.
- [28] **Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos** «Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea – Declaración de Impacto Ambiental» , Chile, 2010.
- [29] **Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos** «Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea – Expomin» , Chile, 2010.
- [30] **Availability Workbench**, «Isograph Availability Workbench – User Guide». 2009
- [31] **Geer Mountain Software Corporation**, «Stat-Fit Version 2 Statistically Fit Software». 2001
- [32] **InfoMine USA, Inc.** «Mine and Mill Equipment Costs”, Washington, EEUU, 2008.

8. ANEXOS

Tabla 24: Detalle nomenclatura escenarios.

	Sin Mantenición/Inspección				Con Mantenición/Inspección		
	Conservador	Normal	Abundante		Conservador	Normal	Abundante
Pocos puntos fallados	PE1 ER1 SMI	PE1 ER2 SMI	PE1 ER3 SMI		PE1 ER1 CMI	PE1 ER2 CMI	PE1 ER3 SMI
Media puntos fallados	PE2 ER1 SMI	PE2 ER2 SMI	PE2 ER3 SMI		PE2 ER1 CMI	PE2 ER2 CMI	PE2 ER3 CMI
Muchos puntos fallados	PE3 ER1 SMI	PE3 ER2 SMI	PE3 ER3 SMI		PE3 ER1 CMI	PE3 ER3 CMI	PE3 ER3 CMI

8.1. Detalle de requerimientos de equipos y recursos

Tabla 25: Requerimientos de equipos y recursos para las reparaciones y mantenimientos.

Reparación y mantención		Operador	Personal	Mecánico	Coligue	Explosivos	Jumbo	Maquinaria	Combustible	Martillo	Desmontador	Generador	Herramientas	Auxiliares
Punto de extracción	Colgadura	6	2	-	5	3	-	-	2	-	-	-	12	-
	Sobretamaño	5	3	1	-	-	2	-	3	-	-	-	8	-
Subcalle	LHD	8	4	3	-	-	-	-	6	-	-	-	15	-
	Carpeta	2	8	2	-	2	1	1	2	-	1	-	10	-
	Estocada	2	10	3	-	2	-	1	2	1	1	-	16	-
	Imprevistos	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Parrilla	Bolones	9	2	-	-	-	-	-	4	3	-	-	6	-
	Infraestructura	-	9	2	-	1	1	1	-	1	-	-	12	-
Pique	Colgadura	10	4	-	5	3	-	1	2	-	-	-	14	-
	Mecánica	3	6	2	2	2	-	1	-	-	-	-	8	-
	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Imprevisto	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
Tolva	Desgaste	1	10	-	-	-	-	1	4	-	1	-	8	-
	Infraestructura	-	8	-	-	1	-	1	2	-	1	-	10	-
	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentador	Eléctrica	1	6	-	-	-	-	-	2	-	-	2	3	-
	Componentes	1	10	1	-	-	-	1	2	-	1	-	10	-
	Imprevisto	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
Chancador	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Eléctrica	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	4	6	-
	Atollo	-	6	-	3	-	-	-	-	-	-	-	10	-
	Otros	-	10	2	-	-	-	1	-	-	1	-	12	-
Correa	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Eléctrica	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	4	-
	Componentes	-	10	1	-	-	-	-	-	-	1	-	8	-
	Rotura	1	15	2	-	-	-	1	2	-	1	-	6	-

Tabla 26: Requerimiento de equipos y recursos para las inspecciones.

Inspección		Operador	Personal	Mecánico	Coligue	Explosivos	Jumbo	Maquinaria	Combustible	Martillo	Desmontador	Generador	Herramientas	Auxiliares
Punto de extracción	Colgadura	5	2	-	3	1	-	-	1	-	-	-	3	-
	Sobretamaño	2	2	1	-	-	1	-	1	-	-	-	2	-
Subcalle	LHD	3	2	2	-	-	-	-	2	-	-	-	5	-
	Carpeta	1	4	1	-	1	-	-	1	-	-	-	4	-
	Estocada	1	6	1	-	-	-	-	1	-	-	-	8	-
	Imprevistos	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
Parrilla	Bolones	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Infraestructura	-	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-
Pique	Colgadura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mecánica	1	3	-	1	1	-	-	-	-	-	-	3	-
	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Imprevisto	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Tolva	Desgaste	-	6	1	-	-	-	-	1	-	-	-	5	-
	Infraestructura	-	6	-	-	-	-	1	1	-	-	-	4	-
	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentador	Eléctrica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Componentes	-	4	2	-	-	-	1	-	-	-	-	4	-
	Imprevisto	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
Chancador	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Eléctrica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Atollo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Otros	-	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
Correa	Capacidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Eléctrica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Componentes	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-
	Rotura	-	4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	6	-

8.2. Distribuciones de fallas

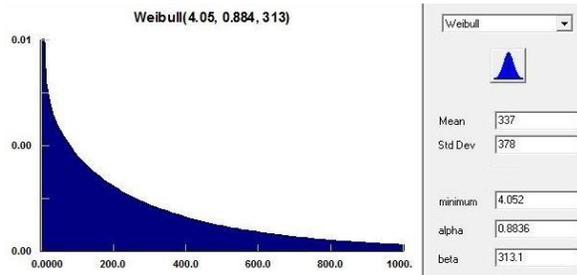


Gráfico 15: Distribución falla de punto de extracción por coladura (1.1).

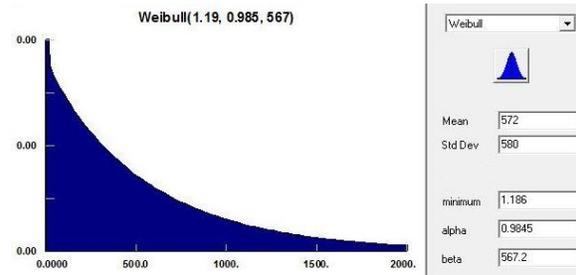


Gráfico 16: Distribución falla de punto de extracción por sobretamaño (1.2).

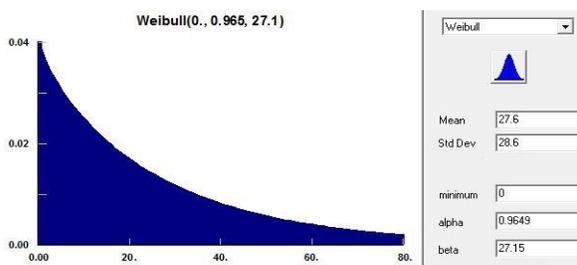


Gráfico 17: Distribución falla de LHD (2.1).

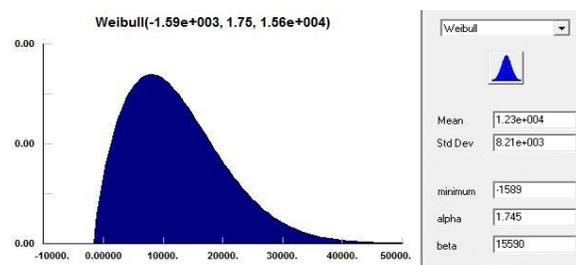


Gráfico 18: Distribución falla de carpeta (2.2).

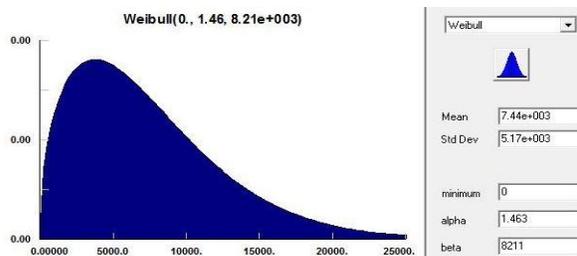


Gráfico 19: Distribución falla de estocadas (2.3).

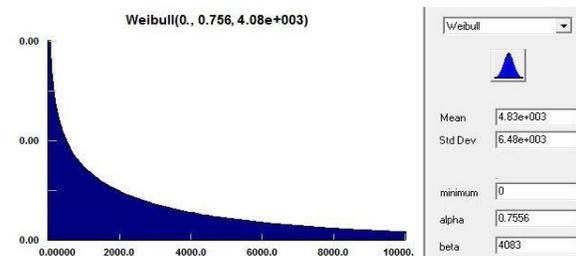


Gráfico 20: Distribución falla inesperada calle (2.4).

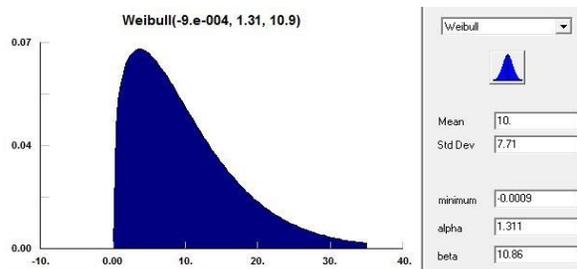


Gráfico 21: Distribución falla por bolones en parrilla (3.1).

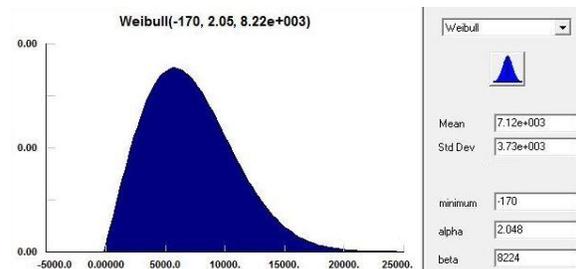


Gráfico 22: Distribución falla de infraestructura parrilla (3.2).

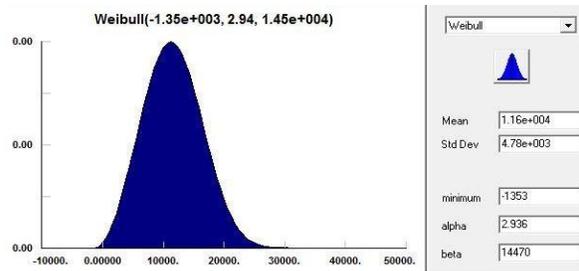


Gráfico 23: Distribución falla de piques por colgadura (4.1).

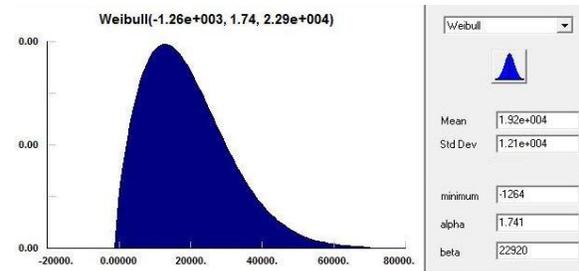


Gráfico 24: Distribución fallas mecánicas de pique (4.2).

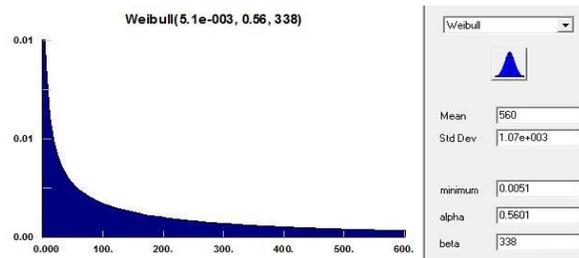


Gráfico 25: Distribución fallas de pique por capacidad (4.3).

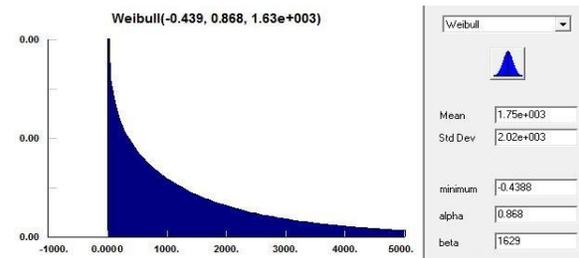


Gráfico 26: Distribución fallas inesperadas en pique (4.4).

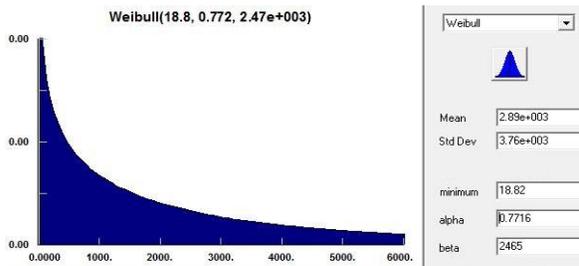


Gráfico 27: Distribución falla por desgaste de tolva (5.1).

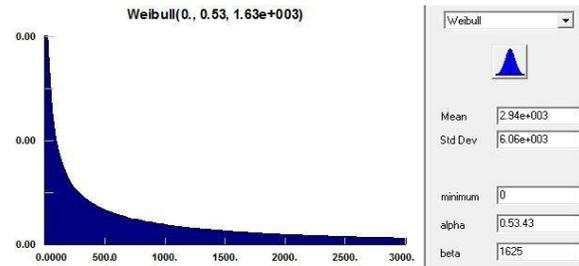


Gráfico 28: Distribución falla infraestructura de tolva (5.2).

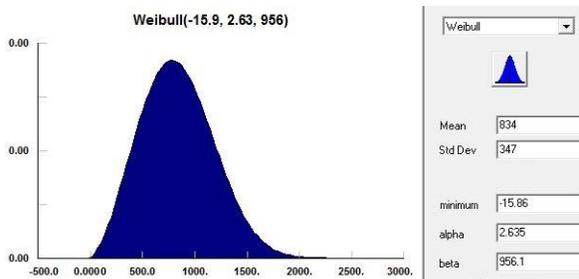


Gráfico 29: Distribución falla de tolva por capacidad (5.3).

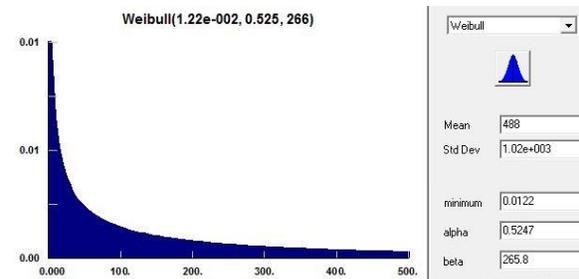


Gráfico 30: Distribución falla de alimentador por falta de energía (6.1).

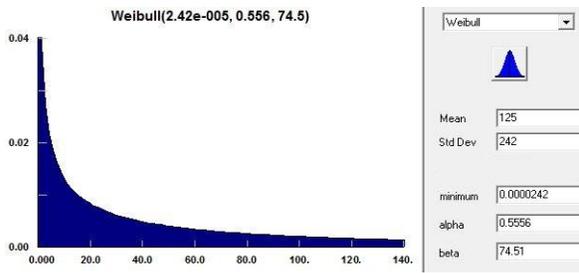


Gráfico 31: Distribución falla de componentes de alimentador (6.2).

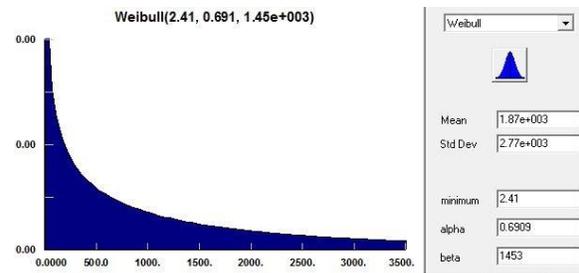


Gráfico 32: Distribución falla inesperada de alimentador (6.3).

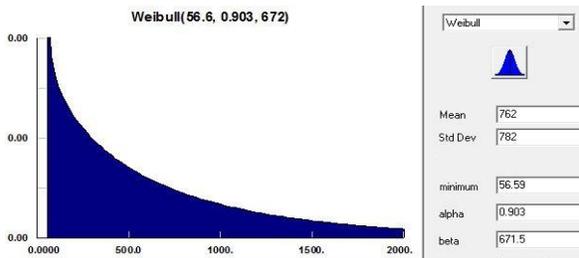


Gráfico 33: Distribución falla de chancador por capacidad (7.1).

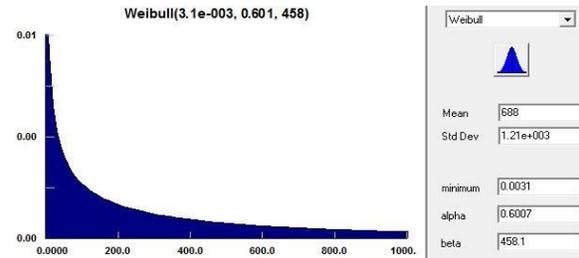


Gráfico 34: Distribución falla de chancador por falta de energía (7.2).

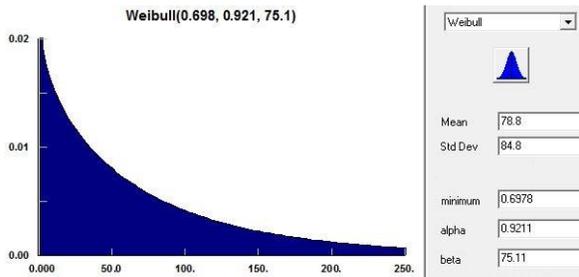


Gráfico 35: Distribución falla de chancador por presencia de atollos (7.3).

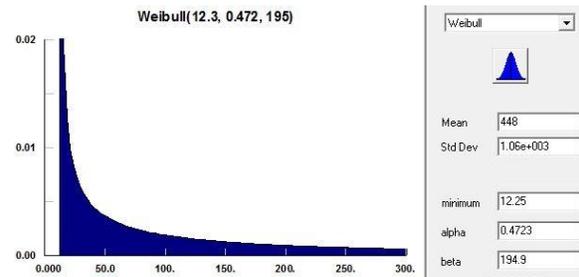


Gráfico 36: Distribución fallas chancador por otras razones (7.4).

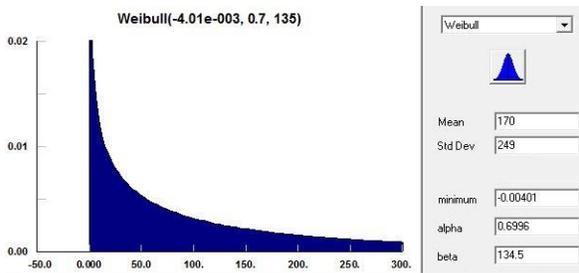


Gráfico 37: Distribución falla de correa por capacidad (8.1).

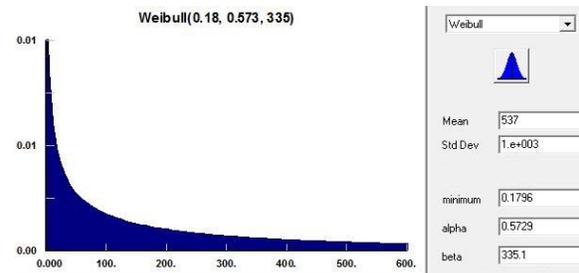


Gráfico 38: Distribución falla de correa por falta de energía (8.2).

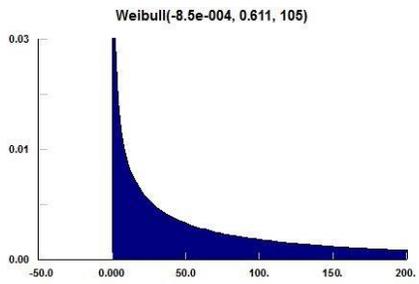


Gráfico 39: Distribución falla de los componentes de la correa (8.3).

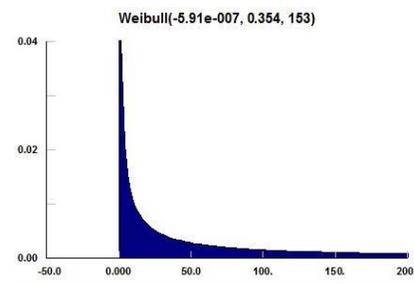
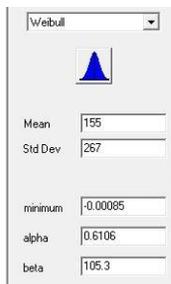
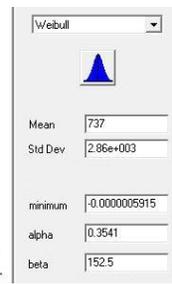


Gráfico 40: Distribución falla por rotura de correa (8.4).



8.3. Resultados

Tabla 27: Resultados PE1 - ER1 - CMI

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,393579	2.829,66	0,832	60,64%
Subcalles	0,011569	816,151	11,593	98,84%
Parrillas	0,00708	50,975	29,965	99,29%
Piques de traspaso	0,001231	8,861	1,398	99,88%
Tolvas	0,01062	76,465	1,319	98,94%
Alimentadores	0,013863	99,8	9,339	98,61%
Chancadores	0,021715	156,35	26,355	97,83%
Correas	0,008874	638,9	45,86	99,11%
Macrobloque	0,6644	4.783	134	33,56%

Tabla 28: Resultados PE1 - ER1 - SMI

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,39355	2.836,51	0,842	60,64%
Subcalles	0,01111	80,028	11,114	98,89%
Parrillas	0,00645	46,411	33,781	99,36%
Piques de traspaso	0,00121	8,707	1,376	99,88%
Tolvas	0,01051	75,69	1,336	98,95%
Alimentadores	0,01358	97,765	8,924	98,64%
Chancadores	0,01958	140,9	23,895	98,04%
Correas	0,0847	609,8	43,55	91,53%
Macrobloque	0,6632	4.775	129,5	33,68%

Tabla 29: Resultados PE1 - ER2 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,39875	3.069,301	0,839	60,12%
Subcalles	0,00639	46,03	11,471	99,36%
Parrillas	0,00465	33,48	29,654	99,54%
Piques de traspaso	0,00093	7,587	1,356	99,91%
Tolvas	0,00996	71,72	1,3205	99%
Alimentadores	0,01032	74,313	9,31075	98,97%
Chancadores	0,00685	90,405	26,18	99,31%
Correas	0,08357	601,7	45,82	91,64%
Macrobloque	0,6676	4.806	133,4	33,24%

Tabla 30: Resultados PE1 - ER2 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,39997	2.886,706	0,842	60%
Subcalles	0,00629	45,271	11,108	99,37%
Parrillas	0,00466	33,535	29,765	99,53%
Piques de traspaso	0,00105	7,590	1,382	99,89%
Tolvas	0,01006	72,425	1,302	98,99%
Alimentadores	0,00998	71,818	8,864	99%
Chancadores	0,01082	77,9	23,745	98,92%
Correas	0,078	561,6	43,27	92,2%
Macrobloque	0,6663	4.798	128,3	33,37%

Tabla 31: Resultados PE1 - ER3 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,39793	2.872,114	0,839	60,21%
Subcalles	0,00565	45,775	11,571	99,44%
Parrillas	0,00464	33,443	29,833	99,54%
Piques de traspaso	0,00107	7,72	1,386	99,89%
Tolvas	0,00996	71,703	1,303	99%
Alimentadores	0,01041	74,935	9,416	98,96%
Chancadores	0,01253	90,19	26,405	98,75%
Correas	0,0824	593,3	44,98	91,76%
Macrobloque	0,6655	4.791	132,9	33,45%

Tabla 32: Resultados PE1 - ER3 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,40077	3.066,84	0,839	59,92%
Subcalles	0,00614	44,231	11,046	99,39%
Parrillas	0,00464	33,38	29,74	99,54%
Piques de traspaso	0,00108	7,76	1,379	99,89%
Tolvas	0,01042	74,975	1,318	98,96%
Alimentadores	0,00986	70,973	8,754	99,01%
Chancadores	0,0569	75,95	23,57	94,31%
Correas	0,07742	557,5	42,6	92,26%
Macrobloque	0,667	4.803	127,7	33,3%

Tabla 33: Resultados PE2 - ER1 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,29774	2.094,721	1,295	70,23%
Subcalles	0,02724	196,121	26,421	97,28%
Parrillas	0,01945	140,004	68,888	98,06%
Piques de traspaso	0,00242	17,454	2,417	99,76%
Tolvas	0,01671	120,273	3,197	98,33%
Alimentadores	0,02952	212,55	19,862	97,05%
Chancadores	0,04986	358,95	59,355	95,01%
Correas	0,1822	1.312	98,19	81,78%
Macrobloque	0,2326	1.675	141,2	76,74%

Tabla 34: Resultados PE2 - ER1 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,28942	2.086,393	1,311	71,06%
Subcalles	0,02366	196,351	25,883	97,63%
Parrillas	0,01721	123,933	70,337	98,28%
Piques de traspaso	0,00224	16,121	2,373	99,78%
Tolvas	0,01603	115,448	2,988	98,4%
Alimentadores	0,02552	183,735	17,386	97,45%
Chancadores	0,04175	300,6	37,645	95,83%
Correas	0,1739	1.252	93,96	82,61%
Macrobloque	0,2168	1.334	132,7	78,32%

Tabla 35: Resultados PE2 - ER2 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,2891	2.067,508	1,353	71,09%
Subcalles	0,01561	112,415	27,853	98,44%
Parrillas	0,01166	83,948	72,338	98,83%
Piques de traspaso	0,00224	16,142	2,597	99,78%
Tolvas	0,01683	121,145	3,357	98,32%
Alimentadores	0,02355	169,505	20,884	97,65%
Chancadores	0,03067	221,26	62,66	96,93%
Correas	0,1778	1.280	101,8	82,22%
Macrobloque	0,1933	1.334	132,7	80,67%

Tabla 36: Resultados PE2 - ER2 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,28444	2.047,818	1,367	71,56%
Subcalles	0,0155	111,607	26,965	98,45%
Parrillas	0,0118	84,641	73,131	98,82%
Piques de traspaso	0,00204	14,695	2,406	99,8%
Tolvas	0,01589	114,42	3,132	98,41%
Alimentadores	0,02005	144,385	18,083	97,99%
Chancadores	0,02472	177,99	54,7	97,53%
Correas	0,172	1.239	99,04	82,8%
Macrobloque	0,1852	1.334	132,7	81,48%

Tabla 37: Resultados PE2 - ER3 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,2931	2.109,073	28,397	70,69%
Subcalles	0,01551	111,651	28,023	98,45%
Parrillas	0,01153	83,027	72,212	98,85%
Piques de traspaso	0,00223	16,068	2,532	99,78%
Tolvas	0,01679	120,89	3,341	98,32%
Alimentadores	0,02317	166,818	20,792	97,68%
Chancadores	0,02969	213,74	62,18	97,03%
Correas	0,1773	1.277	103,4	82,27%
Macrobloque	0,1932	1.391	142,3	80,68%

Tabla 38: Resultados PE2 - ER3 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,28418	2.039,827	1,362	71,58%
Subcalles	0,01524	109,722	26,85	98,48%
Parrillas	0,01169	84,138	72,905	98,83%
Piques de traspaso	0,00204	14,691	2,409	99,8%
Tolvas	0,01646	118,528	3,134	98,35%
Alimentadores	0,01946	140,085	17,739	98,05%
Chancadores	0,02349	169,105	54,105	97,65%
Correas	0,172	1.239	98,28	82,8%
Macrobloque	0,1878	1.352	131,3	81,22%

Tabla 39: Resultados PE3 - ER1 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,41881	2.925,931	0,818	58,12%
Subcalles	0,02149	154,725	22,991	97,85%
Parrillas	0,01453	104,599	59,664	98,55%
Piques de traspaso	0,00209	15,034	2,527	99,79%
Tolvas	0,0159	114,45	2,693	98,41%
Alimentadores	0,02504	180,25	17,505	97,5%
Chancadores	0,04043	291,05	51,75	95,96%
Correas	0,1601	1.152	85,65	83,99%
Macrobloque	0,3347	2.410	220	66,53%

Tabla 40: Resultados PE3 - ER1 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,4164	2.993,151	0,829	58,36%
Subcalles	0,0208	149,738	22,404	97,92%
Parrillas	0,0133	170,775	60,278	98,67%
Piques de traspaso	0,00197	14,163	2,258	99,8%
Tolvas	0,01643	118,275	2,732	98,36%
Alimentadores	0,02271	163,475	15,633	97,73%
Chancadores	0,03412	245,6	45,455	96,59%
Correas	0,1539	1.108	81,89	84,61%
Macrobloque	0,3278	2.360	205,2	67,22%

Tabla 41: Resultados PE3 - ER2 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,43298	3.111,893	0,829	56,7%
Subcalles	0,01297	92,996	23,443	98,7%
Parrillas	0,00953	68,58	60,341	99,05%
Piques de traspaso	0,00186	13,409	2,298	99,81%
Tolvas	0,01618	116,425	2,763	98,38%
Alimentadores	0,01943	139,875	17,678	98,06%
Chancadores	0,02547	183,35	52,695	97,45%
Correas	0,1533	1.104	86,78	84,67%
Macrobloque	0,3248	2.338	223,4	67,52%

Tabla 42: Resultados PE3 - ER2 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,431	3.098,733	0,835	56,9%
Subcalles	0,01149	92,513	22,678	98,85%
Parrillas	0,0097	69,826	61,339	99,03%
Piques de traspaso	0,00192	13,844	2,299	99,81%
Tolvas	0,01549	111,513	2,69	98,45%
Alimentadores	0,01758	126,575	15,838	98,24%
Chancadores	0,02048	147,45	46,245	97,95%
Correas	0,1495	1.055	83,23	85,05%
Macrobloque	0,3162	2.277	211,6	68,38%

Tabla 43: Resultados PE3 - ER3 - CMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,43912	3.127,2	0,833	56,09%
Subcalles	0,01279	92,101	23,469	98,72%
Parrillas	0,00956	68,798	60,783	99,04%
Piques de traspaso	0,00191	13,789	2,309	99,81%
Tolvas	0,01534	110,448	2,691	98,47%
Alimentadores	0,01957	130,675	17,788	98,04%
Chancadores	0,02515	181,05	52,7	97,49%
Correas	0,1518	1.093	87,13	84,82%
Macrobloque	0,3227	2.323	225,4	67,73%

Tabla 44: Resultados PE3 - ER3 - SMI.

Sistema	Promedio no-disponibilidad	Tiempo total de fallas	Número de fallas	Disponibilidad
Puntos de extracción	0,43362	3.327,588	0,838	56,64%
Subcalles	0,01268	91,314	22,644	98,73%
Parrillas	0,00966	69,523	61,304	99,03%
Piques de traspaso	0,00189	13,631	2,31	99,81%
Tolvas	0,01559	110,46	2,65	98,44%
Alimentadores	0,01763	126,95	15,885	98,24%
Chancadores	0,02013	144,9	45,88	97,99%
Correas	0,1468	1.057	83	85,32%
Macrobloque	0,3171	2.283	212,5	68,29%

8.4. Detalle de tiempos y cantidades de interferencias y reparaciones

Tabla 45: Detalle de tiempos e interferencias para los puntos de extracción.

Escenario	1.1 Punto colgado		1.2 No carga LHD	
	Tiempo Fuera de Servicio	N° Interferencias	Tiempo Fuera de Servicio	N° Interferencias
PE1 - ER1 - CMI	266.200	78,9	140.300	42,05
PE1 - ER1 - SMI	266.600	79,16	140.800	42,16
PE1 - ER2 - CMI	271.000	78,96	142.300	41,83
PE1 - ER2 - SMI	271.300	78,73	143.400	42,26
PE1 - ER3 - CMI	271.700	78,91	141.800	41,98
PE1 - ER3 - SMI	272.000	78,95	142.600	41,8
PE2 - ER1 - CMI	201.500	120,7	104.900	65,7
PE2 - ER1 - SMI	198.400	122,2	101.600	66,69
PE2 - ER2 - CMI	197.000	126,1	102.700	68,97
PE2 - ER2 - SMI	193.300	127,3	101.600	69,67
PE2 - ER3 - CMI	199.300	126,1	104.400	69,16
PE2 - ER3 - SMI	194.000	126,6	100.600	69,57
PE3 - ER1 - CMI	282.300	76,22	150.000	41,6
PE3 - ER1 - SMI	282.200	77,48	148.900	41,89
PE3 - ER2 - CMI	293.200	77,63	154.800	42,12
PE3 - ER2 - SMI	292.600	78,54	153.900	42,25
PE3 - ER3 - CMI	295.400	77,93	156.400	41,09
PE3 - ER3 - SMI	293.400	78,07	156.200	42,59

Tabla 46: Detalle de tiempos y reparaciones para los puntos de extracción.

Escenario	1.1 Descuelgue punto		1.2 Reducción secundaria	
	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones
PE1 - ER1 - CMI	31,8	31,87	13,64	17,08
PE1 - ER1 - SMI	32,15	32,19	13,66	17,14
PE1 - ER2 - CMI	31,82	31,88	13,52	16,92
PE1 - ER2 - SMI	31,72	31,74	13,87	17,24
PE1 - ER3 - CMI	31,77	31,73	13,69	17,15
PE1 - ER3 - SMI	31,95	31,9	13,55	16,85
PE2 - ER1 - CMI	79,68	79,82	35,24	44,13
PE2 - ER1 - SMI	82,49	82,44	39,79	45,97
PE2 - ER2 - CMI	87,01	87,11	38,76	48,48
PE2 - ER2 - SMI	89,33	89,37	39,54	49,55
PE2 - ER3 - CMI	86,82	86,89	38,65	48,34
PE2 - ER3 - SMI	88,41	88,6	39,66	49,59
PE3 - ER1 - CMI	9,795	9,73	4,403	5,514
PE3 - ER1 - SMI	11,65	11,62	5,249	6,597
PE3 - ER2 - CMI	10,37	10,41	4,923	6,13
PE3 - ER2 - SMI	11,91	11,95	5,422	6,743
PE3 - ER3 - CMI	10,22	10,2	4,614	5,769
PE3 - ER3 - SMI	11,32	11,3	5,284	6,564

Tabla 47: Detalle de tiempos e interferencias para la correa.

Escenario	8.1 Stock correa		8.2 Correa sin energía		8.3 Correa no disponible		8.4 Correa rajada	
	Tiempo Fuera de Servicio	N° Interferencias						
PE1 - ER1 - CMI	21,87	14,96	14,36	5,703	373,714	18,398	229	6,802
PE1 - ER1 - SMI	21,16	14,58	13,72	5,547	348,5	16,64	226,5	6,78
PE1 - ER2 - CMI	21,81	14,85	12,32	5,654	349,175	18,487	218,5	6,835
PE1 - ER2 - SMI	21,06	14,59	12,62	5,73	323,8	16,58	204,1	6,374
PE1 - ER3 - CMI	21,18	14,45	12,32	5,482	346,462	18,382	213,3	6,672
PE1 - ER3 - SMI	20,77	14,33	13,08	5,685	308,2	15,83	215,4	6,76
PE2 - ER1 - CMI	48,54	33,27	29,06	11,34	841,315	41,778	392,9	11,79
PE2 - ER1 - SMI	48,46	33,18	29,79	11,49	783,8	37,49	390,2	11,8
PE2 - ER2 - CMI	49,89	34,31	25,74	11,63	822,883	43,968	381,5	11,89
PE2 - ER2 - SMI	51,69	35,15	26,95	12,3	765,2	39,22	394,9	12,37
PE2 - ER3 - CMI	50,74	35,23	27,23	12,18	824,566	44,181	374,2	11,8
PE2 - ER3 - SMI	50,42	34,78	26,71	12,05	757,3	38,83	404,2	12,62
PE3 - ER1 - CMI	41,3	28,47	25,55	10,21	739,143	36,57	346,5	10,41
PE3 - ER1 - SMI	41,71	28,59	25,07	9,938	679,3	32,47	361,9	10,89
PE3 - ER2 - CMI	42,09	28,8	22,44	10,18	695,093	37,05	344	10,75
PE3 - ER2 - SMI	42,94	29,42	22,17	10,01	642,8	32,96	347,1	10,84
PE3 - ER3 - CMI	42,98	29,66	22,23	10,03	692,614	36,98	334,8	10,46
PE3 - ER3 - SMI	41,93	28,77	22,68	10,37	642,7	32,97	349,5	10,89

Tabla 48: Detalle de tiempos y reparaciones para la correa.

Escenario	8.1 Espera nivel correa		8.2 Reposición energía correa		8.3 Reemplazo piezas		8.4 Reemplazo o parche	
	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones	Tiempo en Reparaciones	N° de Reparaciones
PE1 - ER1 - CMI	17,38	14,96	9,842	5,703	78,87	17,51	55,19	6,802
PE1 - ER1 - SMI	16,78	14,58	9,342	5,547	74,94	16,64	54,04	6,778
PE1 - ER2 - CMI	17,36	14,85	9,445	5,654	80,2	17,68	53,96	6,835
PE1 - ER2 - SMI	16,68	14,59	9,692	5,73	74,95	16,58	50,89	6,374
PE1 - ER3 - CMI	16,85	14,45	9,583	5,482	79,38	17,56	53,18	6,672
PE1 - ER3 - SMI	16,48	14,33	10,24	5,685	70,8	15,83	53,15	6,76
PE2 - ER1 - CMI	38,56	33,27	19,33	11,34	178	39,66	93,7	11,77
PE2 - ER1 - SMI	38,5	33,18	19,91	11,49	168,2	37,4	92,85	11,77
PE2 - ER2 - CMI	39,6	34,31	19,75	11,63	187,4	41,59	95,12	11,86
PE2 - ER2 - SMI	41,14	35,15	20,66	12,3	177	39,14	97,6	12,33
PE2 - ER3 - CMI	40,17	35,23	21,14	12,18	185,7	41,88	91,47	11,76
PE2 - ER3 - SMI	39,99	34,78	20,68	12,05	175,5	38,75	101,6	12,59
PE3 - ER1 - CMI	32,76	28,47	17,3	10,21	155,8	34,77	83,39	10,4
PE3 - ER1 - SMI	33,13	28,59	16,89	9,937	146,6	32,45	87,03	10,88
PE3 - ER2 - CMI	33,45	28,8	17,28	10,18	158,7	35,16	85,02	10,74
PE3 - ER2 - SMI	34,11	29,42	17,13	10,01	148,3	32,93	86,02	10,84
PE3 - ER3 - CMI	34,08	29,66	17,21	10,03	157,4	35,1	83,88	10,45
PE3 - ER3 - SMI	33,3	28,77	17,5	10,37	148,4	32,94	88,26	10,88

8.5. Usos de equipos y recursos

Tabla 49: Uso de equipos y recursos (1).

Escenario	Operador	Personal	Mecánico	Coligue	Explosivos	Jumbo	Maquinaria
PE1 - ER1 - CMI	3.982,92	9.218,2	1.231,86	373,2	365,8	32,95	562,05
PE1 - ER1 - SMI	3.946	8.775	1.168	375,3	366,8	34,62	527,9
PE1 - ER2 - CMI	3.953,5	9.099,8	1.226,67	367	359,7	34,37	552,7
PE1 - ER2 - SMI	3.930	8.632	1.159	370,7	362	34,6	515,4
PE1 - ER3 - CMI	3.979,12	9.111,5	1.232,17	371,6	356,7	35,21	550,78
PE1 - ER3 - SMI	3.911	8.664	1.149	370,8	369,7	33,97	520,7
PE2 - ER1 - CMI	9.142,1	18.857	2.82	883,7	704,62	102	1.070,67
PE2 - ER1 - SMI	9.197	17.070	2.639	910	708,3	108,4	927,3
PE2 - ER2 - CMI	9.643,5	19.845	2.979,8	951,4	751,42	111,7	1.126,81
PE2 - ER2 - SMI	9.630	17.910	2.781	967,9	750,9	117,4	971,8
PE2 - ER3 - CMI	9.670,2	19.725	2.980,4	938	748,32	112,9	1.118,96
PE2 - ER3 - SMI	9.578	17.880	2.758	953,8	768,5	120,2	977,9
PE3 - ER1 - CMI	7.451,2	16.477,2	2.398	470,3	454,23	25,95	965,48
PE3 - ER1 - SMI	7.432	15.380	2.240	483,4	482,9	31,56	878,7
PE3 - ER2 - CMI	7.568,5	16.763,2	2.451,9	482,5	473,19	30,82	986,5
PE3 - ER2 - SMI	7.555	15.440	2.274	493	473,9	33,56	867,7
PE3 - ER3 - CMI	7.594,7	16.677,6	2.452,7	479,5	452,34	27,2	972,16
PE3 - ER3 - SMI	7.554	15.440	2.284	483,8	471,1	34,27	870,9

Tabla 50: Uso de equipos y recursos (2).

Escenario	Combustible	Martillo	Desmontador	Generador	Herramientas	Auxiliares
PE1 - ER1 - CMI	3.370,84	436,4	643,29	99,71	12.363,8	1.382
PE1 - ER1 - SMI	3.336	438,7	600,6	97,12	11.860	1.378
PE1 - ER2 - CMI	3.332,71	432,9	634,37	98,8	12.224,2	1.348
PE1 - ER2 - SMI	3.308	435,6	588,2	99,09	11.730	1.372
PE1 - ER3 - CMI	3.345,64	434,1	632,16	98,55	12.240,7	1.380
PE1 - ER3 - SMI	3.310	434,7	589,7	101,6	11.720	1.409
PE2 - ER1 - CMI	7.241	1.027	1.242,03	185,8	26.329	2.883,3
PE2 - ER1 - SMI	7.165	1.053	1.076	189,5	24.820	2.471
PE2 - ER2 - CMI	7.609,4	1.084	1.303,9	187	27.835	3.042,6
PE2 - ER2 - SMI	7.489	1.098	1.128	187,1	26.010	2.639
PE2 - ER3 - CMI	7.626	1.081	1.294,98	191,1	27.752	3.030,8
PE2 - ER3 - SMI	7.480	1.096	1.131	190,8	25.930	2.587
PE3 - ER1 - CMI	6.183,47	874,8	1.123,77	169,2	22.310	2.460,55
PE3 - ER1 - SMI	6.161	889,1	1.017	168,3	21.180	2.376
PE3 - ER2 - CMI	6.288,3	887,7	1.146,21	167,3	22.742	2.459,78
PE3 - ER2 - SMI	6.207	907	1.006	172,3	21.300	2.462
PE3 - ER3 - CMI	6.266,5	894,9	1.129,69	168,6	22.635,8	2.522,04
PE3 - ER3 - SMI	6.205	905,6	1.010	171,1	21.290	2.427

8.6. Secuencia de extracción y plan de producción

Tabla 51: Detalle del porcentaje de extracción.

Extracción [%]	Color
0	
25	
50	
75	
100	

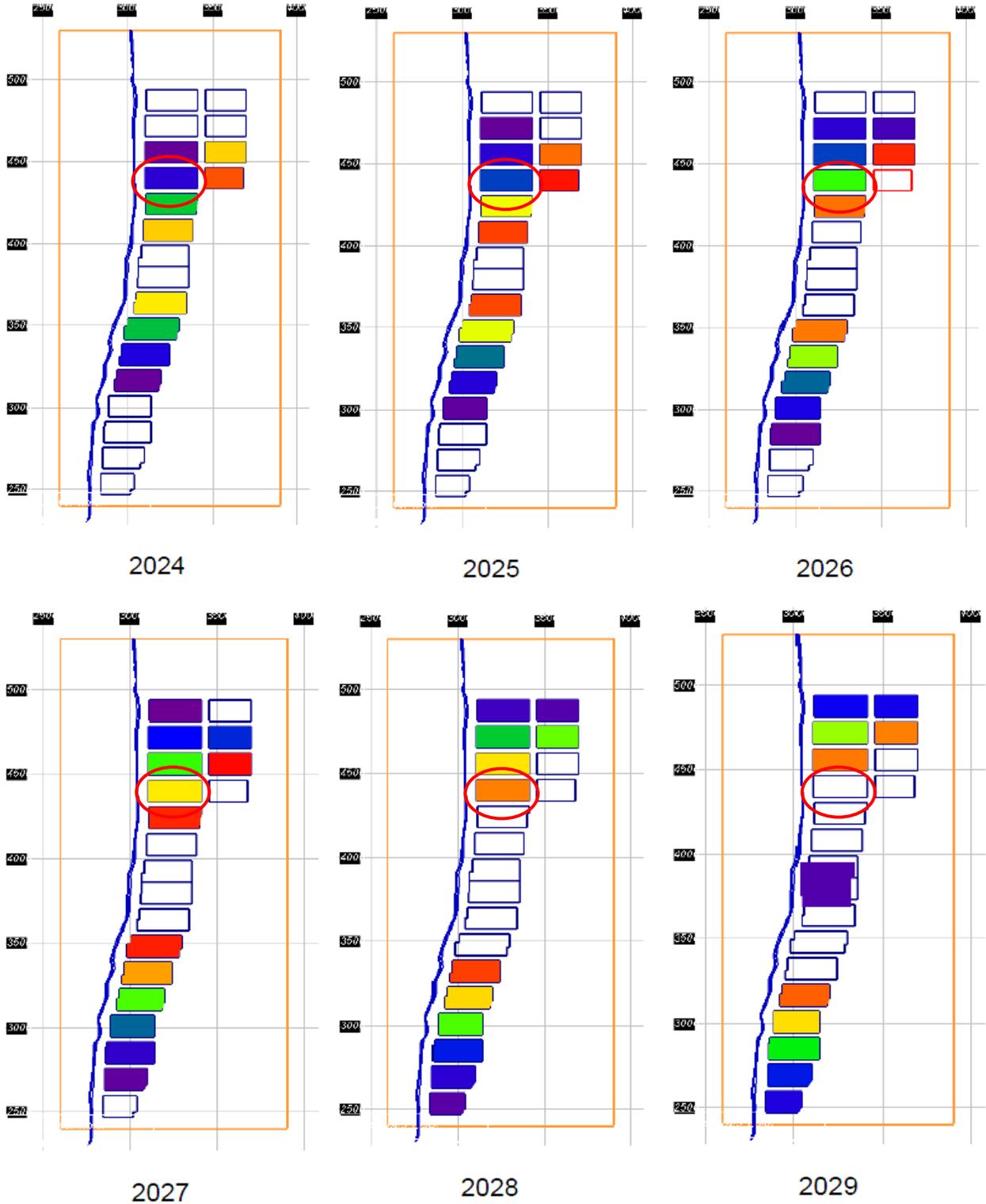


Ilustración 9: Secuencia de extracción MB N5-1.

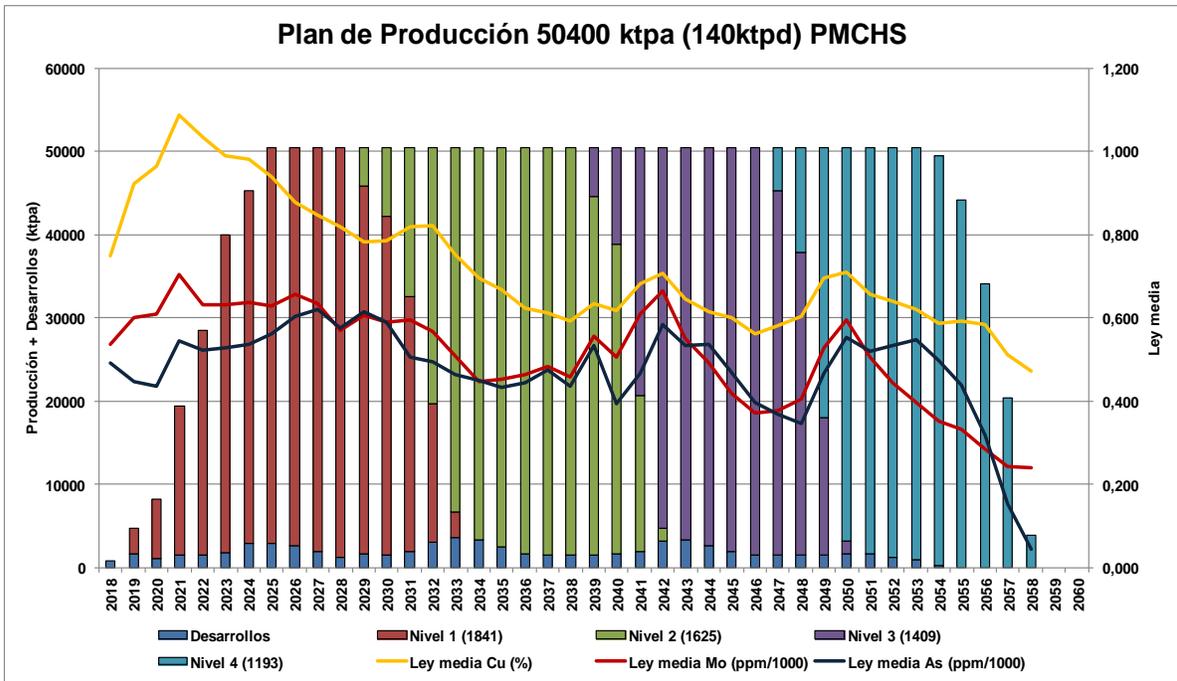


Gráfico 41: Plan de producción PMCHS.

8.7. Detalle de toneladas, disponibilidad, y productividad

Tabla 52: Máximas toneladas procesables por componente para cada escenario.

Escenario	Puntos de extracción	LHD + Subcalles - Parrillas - Piques	Tolvas - Alimentadores	Chancadores	Correa	Máximo tonelaje
PE1 ER1 CMI	9.214.140	9.096.662	16.469.233	15.483.708	9.615.251	9.096.662
PE1 ER1 SMI	9.214.569	9.106.842	16.475.808	15.517.579	9.657.879	9.106.842
PE1 ER2 CMI	9.135.537	9.169.416	16.540.106	15.718.919	9.669.803	9.135.537
PE1 ER2 SMI	9.117.094	9.169.193	16.544.339	15.656.148	9.728.575	9.117.094
PE1 ER3 CMI	8.529.431	9.175.035	15.420.348	14.572.213	9.027.422	8.529.431
PE1 ER3 SMI	8.489.152	9.170.511	15.421.816	13.917.514	9.076.416	8.489.152
PE2 ER1 CMI	10.670.381	8.830.396	16.102.134	15.038.325	8.629.098	8.629.098
PE2 ER1 SMI	10.796.783	8.884.697	16.180.963	15.166.606	8.716.677	8.716.677
PE2 ER2 CMI	10.801.668	9.008.506	16.200.982	15.341.974	8.675.526	8.675.526
PE2 ER2 SMI	10.872.380	9.010.139	16.275.708	15.436.218	8.736.725	8.736.725
PE2 ER3 CMI	10.740.862	9.010.764	16.207.996	15.357.564	8.680.801	8.680.801
PE2 ER3 SMI	10.876.462	9.013.521	16.276.092	15.455.606	8.736.725	8.736.725
PE3 ER1 CMI	8.830.803	8.930.139	16.191.430	15.187.577	8.862.289	8.830.803
PE3 ER1 SMI	8.867.329	8.948.669	16.221.819	15.287.448	8.927.709	8.867.329
PE3 ER2 CMI	8.615.472	9.055.581	16.281.414	15.424.276	8.934.040	8.615.472
PE3 ER2 SMI	8.645.562	9.067.092	16.324.338	15.503.255	8.974.136	8.645.562
PE3 ER3 CMI	8.522.128	9.056.541	16.293.190	15.429.341	8.949.867	8.522.128
PE3 ER3 SMI	8.605.751	9.056.826	16.321.679	15.508.794	9.002.625	8.605.751

8.8. Resultados mostrados por AvSim

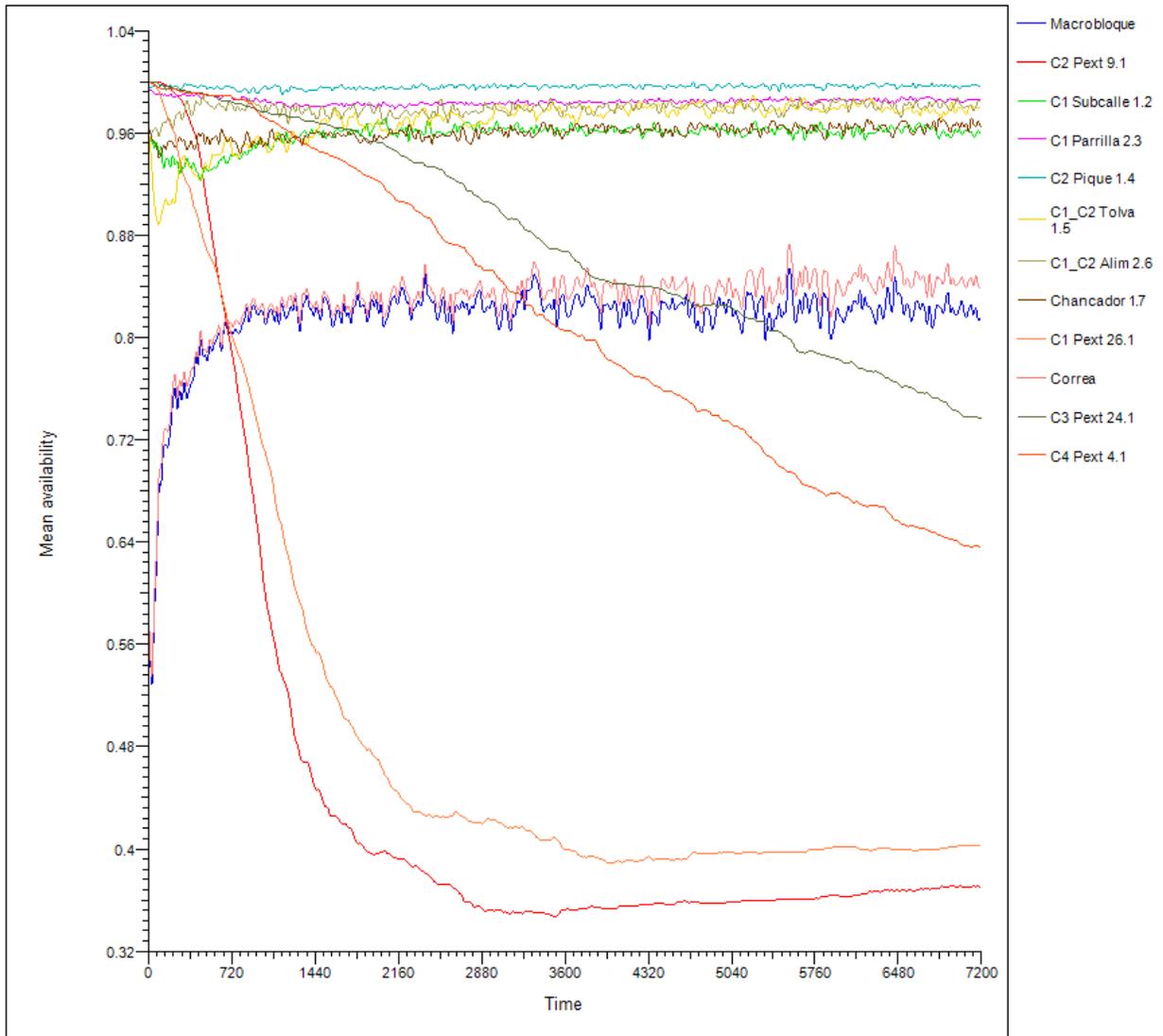


Gráfico 42: Disponibilidad de componentes.

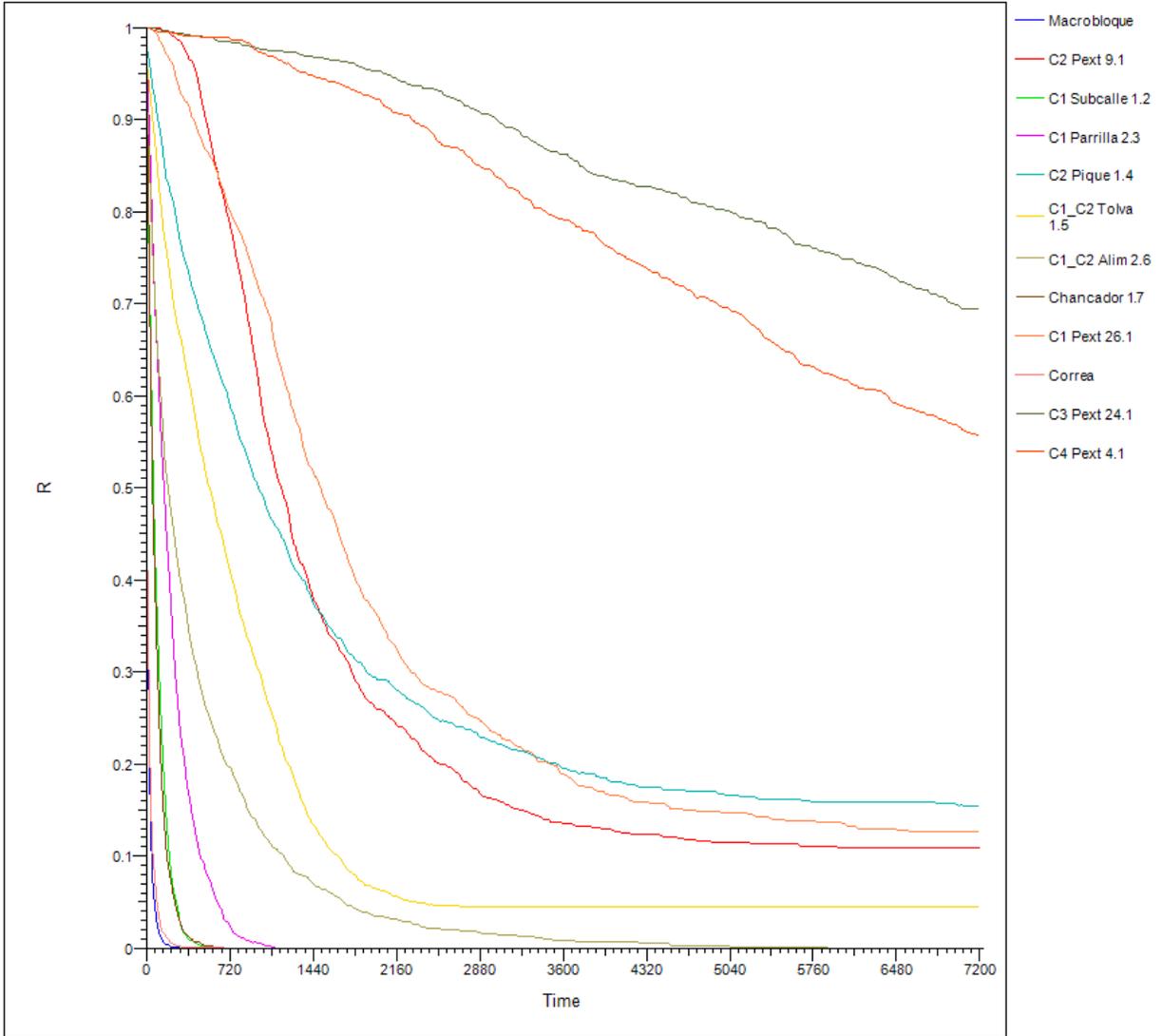


Gráfico 43: Confiabilidad de componentes.