

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

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN SECTOR DIABLO REGIMIENTO,
MINA EL TENIENTE, MEDIANTE SIMULACIÓN A EVENTOS DISCRETOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FÉLIX RUBÉN VALENZUELA NÚÑEZ

PROFESOR GUÍA:
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NELSON MORALES VARELA
JORGE CONTRERAS ROMO

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Félix Rubén Valenzuela Núñez
FECHA: 24 de febrero del 2017
PROFESOR GUÍA: Javier Cornejo González

SIMULACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO SECTOR DIABLO REGIMIENTO, MINA EL TENIENTE

En las minas explotadas mediante el método de Block / Panel Caving, el carguío y el transporte de mineral es una de las principales operaciones que definen la productividad y que al mismo tiempo posee una gran cantidad de interferencias operacionales, las cuales son causadas por fallas, mantenciones y desviaciones propias del proceso de extracción, generándose de esta forma la necesidad de poder estimar la certeza que poseen los planes de producción, tomando en consideración la variabilidad del proceso minero. Como respuesta a esta necesidad, la simulación de eventos discretos se presenta como una herramienta de alto potencial para modelar las distintas problemáticas, permitiendo representar el proceso minero de manera robusta y confiable.

En este trabajo se utiliza la herramienta computacional DSim con el objetivo de simular el sector Diablo Regimiento de la Mina el Teniente, a fin de validar el modelo creado para el manejo de materiales mediante equipos LHD's en el Nivel de Producción y la utilización de correas en el Nivel de Transporte Intermedio, que recoge las prácticas operacionales directamente como información de entrada para la simulación. El modelo propuesto busca una integración efectiva entre las herramientas de planificación utilizadas en la actualidad por la División El Teniente de Codelco para el método de explotación Panel Caving en su variante avanzada, considerando la base de datos histórica de fallas, reparaciones, frecuencia de colgaduras y reportes de producción de la mina, además de incluir de manera explícita la lógica de operación y la interacción entre el nivel de producción, chancadores y nivel de transporte intermedio (nivel de correas).

Los principales resultados del estudio muestran una alta correlación entre la simulación y la realidad, logrando un error relativo que no supera el 10%. De esta manera la simulación permite identificar las principales interferencias que existen en el manejo de materiales, siendo ésta la asignación de equipos LHD a las distintas calles y fases de la mina. También se identifica que el hecho de permitir sobre extracción en el modelo, permite que se represente la variabilidad que existe en la operación de la mina.

Adicionalmente se evaluó la capacidad productiva total del sistema de correas que posee el sector, simulando un periodo de 3 meses con alimentación continua a cada una de éstas, llegando a la conclusión de que este sistema no es un limitante en el manejo de materiales ya que posee una capacidad de 33,000 tpd, que es mayor a las 20,550 tpd requeridas para el año 2017. De esta manera, el modelo permite identificar las principales condiciones del proceso minero, generando intervalos de confianza para el plan de producción, lo cual permite ajustar la estrategia de operación y estimar su efecto en el plan global.

ABSTRACT

Loading and hauling of ore is one of the main operations that define the production output in Block/Panel Caving mines. The load and haul process has a large amount of operational interferences, infrastructure maintenance and typical deviations of the extraction process (like oversize granulometry and hang up). The planning of a Block/Panel caving mine requires to estimate the certainty of the production plans considering the variability of the mining process.

In response to this need, the simulation of discrete events is presented as a tool with high potential to model the various problems, allowing to represent the mining process in a robust and reliable way.

In this work, the DSim computational tool is used to simulate the Diablo Regimiento sector of El Teniente Mine, the model was created for the hauling of materials using LHD's equipment in the Production Level and a crusher & conveyor system in The Intermediate Transport Level, which considerate the operational practices directly as input information for the simulation.

The proposed model seeks an effective integration between the planning tools currently used by the El Teniente Division of Codelco for the Panel Caving method in its advanced variant, considering the historical database of failures, repairs, hang-up frequency and productions reports of the mine, in addition to explicitly including the logic of the operation and the interaction between the level of production, the crushers and the intermediate level of transport (conveyors level).

The main results of the study show a high correlation between the simulation and reality, achieving a relative error that does not exceed 10%. In this way, it is possible to identify the main interferences that exist in the handling of materials of the studied mine sector, being this the allocation of LHD equipment to the different streets and phases of the mine. It is also identified that the fact of allowing over extraction in the model, allows to represent the variability that exists in the actual extraction of the mine. Additionally, the total productive capacity of the belt system in the sector was evaluated, concluding that this system is not a limitation in the handling of materials since it has a capacity of 33,000 tpd a limitation for the handling. In this way, the model allows identifying the main conditions of the mining process, generating confidence intervals for the production plan, which allows to adjust the operation strategy and to estimate its effect in the plan.

AGRADECIMIENTOS

Qué alegría poder al fin comenzar a escribir los agradecimientos.

En primer lugar, me gustaría agradecerle a mi familia Lilian, Jaime y mi hermano Esteban, que han sido el pilar fundamental en todos los procesos que he tenido en mi vida, siempre atentos y preocupados del cómo este resultado todo, tanto en lo académico, como en lo personal, entregando todo el apoyo que se puede pedir, en las buenas y en las malas, sin duda incondicionales. Definitivamente todo esto es de ustedes

Me gustaría hacer una mención especial a mis abuelos Tata Alfonso y Cholina que han marcado una huella en mi de la cual siempre estaré agradecido, esto también es de ustedes.

A mi polola Carola Sánchez que me ha brindado un apoyo incondicional en estas etapas, tanto en la Universidad, como acá en Rancagua, siempre has estado allí para regalar una sonrisa y el apoyo necesario para seguir. No dejo de sorprenderme y aprender contigo.

A los profesores Javier Cornejo y Nelson Morales por haber depositado su confianza en mí desde un principio para desarrollar esta memoria, por los consejos y la disposición para ayudar en todas las etapas de este trabajo

Agradecer a todos los amigos de la U que he conocido, por hacer de todos estos años universitarios los mejores, dándole importancia a aquellos espacios en los que no estudiábamos precisamente, Juan Cristóbal Arrau, Valentina Quitral, Camila Oñate, Felipe Castro, Aileen Doering, Fernanda Hachim, Hugo Reyas, Diego Medina, Roberto Rojas, Tomas Cataldo, Claudia Baytelman, Lionel Real, Diego Alarcón, Yerko Calquín, Marcelo Riquelme, muchas gracias por ser ustedes mismos y compartir esta etapa conmigo.

Agradecer al Departamento de Minas y toda su gente, especialmente a los funcionarios que siempre respondían con la mejor disposición a los tantos favores que se les pidieron. A los “No Al Trasnoche”, por todo el aguante que tuvimos Matías Navarro, Claudio Soto, Catalina Verdugo, Matías Painepán, Álvaro Acuña, Bastián Clark, Patricio Ávila. A todos los Picuos, por toda la garra que le pusimos a cada partido.

Al Laboratorio Delphos y toda su gente por permitir desarrollar este trabajo dando todas las facilidades para trabajar de la mejor manera, mención honrosa a Javier Pérez, Nelson Espejo, Gerson Morales, por su tremenda disposición y paciencia para ayudar.

Me gustaría mencionar agradecer a todos los profesionales de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo de la División El Teniente Por crear un excelente ambiente de trabajo, integrarme como uno más del grupo, además de la disposición y paciencia que tuvieron para ayudarme en esta memoria. Al grupo de memoristas que se formó durante estos 6 meses con quienes hemos compartidos anécdotas y experiencias que han hecho este proceso sea más llevadero.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Motivación del trabajo..... | 2 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Alcances..... | 3 |
| 1.4. Estructura de la memoria | 4 |
| CAPÍTULO II..... | 5 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 5 |
| 2.1. Antecedentes generales mina El Teniente | 5 |
| 2.2. Planificación Minera | 8 |
| 2.3. Planificación División El Teniente..... | 9 |
| 2.4. Incertidumbre e Interferencias en la operación minera..... | 9 |
| 2.5. Simulación de Eventos Discretos | 10 |
| 2.6. Simulaciones realizadas en División el Teniente..... | 13 |
| 2.7. Simulaciones de eventos discretos de correas trasportadoras | 17 |
| 2.8. Elementos que se incluyen en la simulación | 22 |
| CAPÍTULO 3..... | 28 |
| 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO | 28 |
| 3.1. Definición de la zona de estudio..... | 29 |
| 3.2. Levantamiento de información | 30 |
| 3.3. Conceptualización del modelo..... | 31 |
| 3.4. Desarrollo del modelo de simulación en DSIM..... | 38 |
| 3.5. Verificación y Calibración del modelo..... | 39 |
| 3.6. Validación del modelo | 39 |
| 3.7. Realización de corridas y análisis de la implementación del modelo | 40 |
| CAPÍTULO 4..... | 41 |
| 4. CASO DE ESTUDIO..... | 41 |
| 4.1. Definición de la zona de estudio..... | 41 |
| 4.2. Levantamiento de información | 41 |
| 4.3. Conceptualización del modelo..... | 41 |
| 4.4. Criterios de operación | 55 |
| 4.5. Información de Entrada | 58 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| 4.6. | Variabilidad de réplicas del modelo | 59 |
| 4.7. | Calibración y Validación del Modelo..... | 59 |
| 4.8. | Simulación P-1 2017 | 64 |
| CAPÍTULO 5..... | | 65 |
| 5. | RESULTADOS..... | 65 |
| 5.1. | Variabilidad de réplicas del modelo | 65 |
| 5.2. | Calibración y validación del modelo | 66 |
| 5.3. | Refinamiento del modelo..... | 75 |
| 5.4. | Simulación P-1 2017 | 78 |
| CAPÍTULO 6..... | | 80 |
| 6. | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 80 |
| 6.1. | Análisis Calibración del modelo..... | 80 |
| 6.2. | Análisis validación del modelo mes de marzo | 81 |
| 6.3. | Análisis validación del modelo mes de septiembre | 82 |
| 6.4. | Refinamiento del modelo..... | 83 |
| 6.5. | Resumen validación del modelo..... | 85 |
| 6.6. | Simulación P-1 2017 | 86 |
| 6.7. | Análisis Capacidad de Correas | 87 |
| 6.8. | Limitaciones del Modelo | 90 |
| CAPÍTULO 7..... | | 93 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 93 |
| 7.1. | CONCLUSIONES..... | 93 |
| 7.2. | RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO | 95 |
| CAPÍTULO 8..... | | 96 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 96 |
| 9. | ANEXO | 98 |
| 9.1. | ANEXO A | 98 |
| 9.2. | ANEXO B | 115 |
| 9.3. | ANEXO C | 117 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Parámetros de simulación Pacifico Superior | 17 |
| Tabla 2: Factores y niveles para la simulación de bandas transportadoras. | 18 |
| Tabla 3: Metodología de simulación aplicada a bandas transportadoras | 18 |
| Tabla 4: Características del material transportado por la correa de la publicación..... | 21 |
| Tabla 5: Características de la correa de la publicación | 21 |
| Tabla 6: Coeficientes y factores de la correa de la publicación | 21 |
| Tabla 7: Parámetros equipos LHD | 42 |
| Tabla 8: Parámetros chancador de Mandíbula..... | 43 |
| Tabla 9: Parámetros correa transportadora..... | 43 |
| Tabla 10: Ejemplo de planilla para ingresar inputs del os puntos de extracción..... | 46 |
| Tabla 11: Criterio Disponibilidad de Área por altura de columna en Diablo Regimiento. | 47 |
| Tabla 12: Criterio de Perfil de velocidades en Diablo Regimiento | 47 |
| Tabla 13: Ingreso Plan de producción en el modelo..... | 48 |
| Tabla 14: Parametro distribución uniforme mantención equipo..... | 51 |
| Tabla 15: Tonelaje pasante para mantención de chancadores | 52 |
| Tabla 16: Parámetros distribución Weibull para mantención de chancadores | 52 |
| Tabla 17: Parámetros de distribuciones usadas para falla de correas | 53 |
| Tabla 18: Parámetros de distribución usada para falla de correa BF02 | 54 |
| Tabla 19: Parámetros de distribución usada para falla de equipos LHD | 54 |
| Tabla 20: MTBF y MTTR de los equipos para el modelo de simulación..... | 55 |
| Tabla 21: Parámetros de distribución usada para falla de Chancador F4 | 55 |
| Tabla 22: Equipos utilizados en CPlanner..... | 58 |
| Tabla 23: Características de equipos utilizados en simulación..... | 59 |
| Tabla 24: Error absoluto relativo promedio mes de junio | 68 |
| Tabla 25: Horas por turno de actividades de equipos para junio..... | 69 |
| Tabla 26: Error relativo y absoluto promedio mes de marzo | 72 |
| Tabla 27: Errores relativos absolutos productividades por calles mes de septiembre... 83 | |
| Tabla 28: Promedio errores mes de septiembre dejando las fases 2 y 3 sin altura límite | 84 |
| Tabla 29: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla por Plate Feeder..... | 98 |
| Tabla 30: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre falla por Plate Feeder. | 99 |
| Tabla 31: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Hidráulica | 99 |
| Tabla 32: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Hidráulicas | 100 |
| Tabla 33: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla por Cilindro | 100 |
| Tabla 34: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas por Cilindro | 101 |
| Tabla 35: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 1 | 101 |
| Tabla 36: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 1 | 102 |
| Tabla 37: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 3 y 3 | 102 |
| Tabla 38: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3 | 103 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 39: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 4..... | 104 |
| Tabla 40: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 01... | 105 |
| Tabla 41: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF - 01 | 105 |
| Tabla 42: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 02... | 106 |
| Tabla 43: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 04... | 107 |
| Tabla 44: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF - 04 | 107 |
| Tabla 45: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –01 .. | 108 |
| Tabla 46: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –01 | 108 |
| Tabla 47: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –11 .. | 109 |
| Tabla 48: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –11 | 110 |
| Tabla 49: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –21 .. | 110 |
| Tabla 50: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –21 | 111 |
| Tabla 51: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correas CV – 31 y CV - 32 | 111 |
| Tabla 52: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correas CV – 31 y CV - 32..... | 112 |
| Tabla 53: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV – 41 . | 112 |
| Tabla 54: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV – 41 | 113 |
| Tabla 55: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF04..... | 114 |
| Tabla 56: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF04 | 114 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ubicación instalaciones División el Teniente..... | 6 |
| Figura 2: Niveles y cotas de las minas actuales en operación. Además de los desarrollos del Nuevo Nivel Mina (Gonzalez, 2015) | 6 |
| Figura 3: Ubicación Fases - Mina Diablo Regimiento..... | 7 |
| Figura 4: esquema manejo de materiales Diablo Regimiento | 8 |
| Figura 5: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros (Mayer & Kazakidis, 2007). | 10 |
| Figura 6: Confiabilidad del modelo v/s nivel de detalle..... | 12 |
| Figura 7: Plano del nivel de producción y el nivel de transporte intermedio. | 15 |
| Figura 8: Gráfico de interacciones de los factores: Longitud, velocidad y capacidad de carga de la banda transportadora..... | 20 |
| Figura 9: Numeración de nodos en la discretización de la cinta..... | 22 |
| Figura 10: Imagen ilustrativa LHD (Inc, 2013) | 23 |
| Figura 11: Esquema general Chancador de Mandíbulas (Casalli, 2014) | 24 |
| Figura 12: Correas Transportadoras (Le-Feaux) | 25 |

| | |
|--|----|
| Figura 13: Esquema distribución de rodillos en una correa (Le-Feaux) | 26 |
| Figura 14: Metodología..... | 28 |
| Figura 15: Límite de batería modelo de simulación | 29 |
| Figura 16: Ejemplo de criterios de decisión | 36 |
| Figura 17: Layout nivel de producción Diablo Regimiento..... | 45 |
| Figura 18: Layout nivel de transporte intermedio Diablo Regimiento | 46 |
| Figura 19: Layout Diablo Regimiento | 49 |
| Figura 20: Tiempos de Cambio de turno y colación en un día | 51 |
| Figura 21: Diagrama de toma de decisiones equipo LHD | 56 |
| Figura 22: Diagrama de toma de decisiones equipo LHD | 57 |
| Figura 23: Criterio de decisión de cuadrilla de reducción secundaria..... | 58 |
| Figura 24: Asignación de tareas en base al plan de producción de junio..... | 61 |
| Figura 25: Asignación de tareas en base al plan de producción mes de marzo..... | 63 |
| Figura 26: Asignación de tareas en base al plan de producción mes de septiembre | 64 |
| Figura 27: Plan ingresado al simulacro para año 2017 | 64 |

Índice de gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 Altura v/s Productividad en Diablo regimiento..... | 44 |
| Gráfico 2: Producción planificada y real del año 2015 por mes..... | 60 |
| Gráfico 3:Plan de producción por calle P-0 2015 para el mes de junio | 60 |
| Gráfico 4:Plan de producción por calle de marzo | 62 |
| Gráfico 5: Plan de producción por calle de septiembre | 63 |
| Gráfico 6: Variabilidad de réplicas caso base..... | 65 |
| Gráfico 7: Diferencia porcentual de réplicas en caso base..... | 66 |
| Gráfico 8: Productividad mina mes de junio | 67 |
| Gráfico 9: Productividad por fases mes de junio | 67 |
| Gráfico 10: Productividad por calles mes de junio..... | 68 |
| Gráfico 11: Distribución tiempos LHD mes de junio | 69 |
| Gráfico 12: Productividad correas mes de junio | 70 |
| Gráfico 13: Producción global mina mes de marzo | 71 |
| Gráfico 14:Productividad por fases mes de marzo | 71 |
| Gráfico 15: Productividad por calles mes de marzo | 72 |
| Gráfico 16: Distribución tiempos LHD mes de marzo | 73 |
| Gráfico 17: Producción global mina mes de septiembre | 73 |
| Gráfico 18:Productividad por fases mes de septiembre | 74 |
| Gráfico 19: Productividad por calles mes de septiembre..... | 75 |
| Gráfico 20: Productividad global mina sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, septiembre 2015..... | 76 |
| Gráfico 21: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, septiembre 2015..... | 76 |
| Gráfico 22: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, marzo2015..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 23: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, junio 2015 | 77 |
| Gráfico 24: Productividad Mina Promedio de los 12 meses, año 2017 | 78 |
| Gráfico 25: Producción mina por fases, año 2017 | 78 |
| Gráfico 26: Producción promedio por calles, simulación y plan del 2017 | 79 |
| Gráfico 27: Productividad correas promedio, 2017..... | 79 |
| Gráfico 28: Productividad por calles, mes de septiembre..... | 82 |
| Gráfico 29: Tiempos LHD mes de septiembre..... | 83 |
| Gráfico 30: Productividad por calles mina sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, mes de septiembre | 84 |
| Gráfico 31: Productividad modelos, realidad y errores correspondientes..... | 85 |
| Gráfico 32: Errores promedio absolutos de los distintos modelos respecto a la realidad | 86 |
| Gráfico 33: Tiempos LHD para el año 2017. | 87 |
| Gráfico 34: Productividad sistema de correas alimentación continua..... | 88 |
| Gráfico 35: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala normal | 89 |
| Gráfico 36: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala igual a 3 | 89 |
| Gráfico 37: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala igual a 4.8 | 90 |
| Gráfico 38: Densidad de probabilidad de la duración de falla por Plate Feeder | 98 |
| Gráfico 39: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas por Plate Feeder | 99 |
| Gráfico 40: Densidad de probabilidad de la duración de falla Hidráulica..... | 99 |
| Gráfico 41: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Hidráulicas | 100 |
| Gráfico 42: Densidad de probabilidad de la duración de falla por Cilindro | 100 |
| Gráfico 43: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas por Cilindro | 101 |
| Gráfico 44: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 1 | 101 |
| Gráfico 45: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 1 | 102 |
| Gráfico 46: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 2 y 3..... | 102 |
| Gráfico 47: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3..... | 103 |
| Gráfico 48: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 4 | 103 |
| Gráfico 49: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3..... | 104 |
| Gráfico 50: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 01 | 104 |
| Gráfico 51: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 01 | 105 |
| Gráfico 52: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 02 | 106 |
| Gráfico 53 Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 02 | 106 |
| Gráfico 54: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF – 04 | 107 |
| Gráfico 55: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 04 | 107 |
| Gráfico 56: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –01 | 108 |
| Gráfico 57: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –01 | 108 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 58: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –11 | 109 |
| Gráfico 59: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –11 | 109 |
| Gráfico 60: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –21 | 110 |
| Gráfico 61: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –21 | 110 |
| Gráfico 62: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correas CV – 31 y CV - 32 | 111 |
| Gráfico 63: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correas CV – 31 y CV - 32 | 111 |
| Gráfico 64: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV – 41 | 112 |
| Gráfico 65: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV – 41 | 113 |
| Gráfico 66: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF04 | 113 |
| Gráfico 67: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF04 | 114 |
| Gráfico 68: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 1 | 115 |
| Gráfico 69: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 2 | 115 |
| Gráfico 70: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 3 | 116 |
| Gráfico 71: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 4 | 116 |
| Gráfico 72: Distribución tiempos de chancadores, mes de junio | 117 |
| Gráfico 73: Tiempos correas mes de junio | 117 |
| Gráfico 74: Distribución de tiempos chancadores mes de marzo | 118 |
| Gráfico 75: Tiempos correas mes de marzo | 118 |

Índice de ecuaciones

| | |
|---|----|
| Ecuación 1: Sumatoria para determinar proporción de productividad de calles | 48 |
|---|----|

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En minería subterránea, en particular en las minas explotadas mediante el método de Block / Panel Caving, el carguío y el transporte de mineral es una de las principales operaciones que definen la productividad de la mina, encargándose del movimiento del mineral desde los distintos puntos de extracción hasta la planta procesadora.

El sistema de carguío y transporte a utilizar dentro de un sector de la mina se escoge mediante un análisis económico que evalúa diferentes alternativas que dependen de la ubicación de la mina a explotar y de los desarrollos o niveles previamente creados en otros sectores. De esta manera, es posible que la alternativa escogida cuente con una gran cantidad de interferencias operacionales.

En este sentido, uno de los principales problemas que se presenta en la operación de manejo de materiales, es la identificación de las interacciones e interferencias que existen dentro de los diferentes sectores, es decir que los eventos que ocurren en un nivel determinado, no solo afectan a dicho nivel, sino que a al sistema de manera global. Dado esto es que es al momento de realizar la planificación de la mina, es necesario considerar las mantenciones, fallas y el efecto que producen en cada una de los sistemas que están operando, ya sea aguas arriba o aguas abajo.

Frente a este problema, la simulación de eventos discretos se presenta como una herramienta interesante para entender y modelar las distintas problemáticas mencionadas anteriormente.

En la actualidad existen diversos softwares que se utilizan en el mercado para realizar simulaciones de los sistemas de traspaso de material, cuyas principales limitaciones son la necesidad de poseer personal altamente calificado, que tenga el conocimiento técnico que requiere la programación de las simulaciones. Haciendo que este sea un proceso costoso técnica y computacionalmente para las empresas. Por otro lado, estas herramientas son de simulación general y no están enfocadas en el área minera.

El software Delphos Simulator (DSim) Subterráneo actualmente se encuentra en etapa de desarrollo y está siendo elaborado por el Laboratorio de Planificación Minera de la Universidad de Chile (Delphos). En este trabajo se utilizará esta herramienta para realizar una simulación del manejo de materiales de la mina Diablo Regimiento de la División El Teniente, lo cual permitirá realizar la calibración y validación del software, comparando los resultados de producción obtenidos, con los reales de la mina.

1.1. Motivación del trabajo

El cumplimiento de los planes mineros es uno de los desafíos más significativos en una faena minera, siendo una de las fuentes de discordancia entre la operación y la planificación. Frente a esto, surge la necesidad de identificar y estimar los principales problemas que ocurren en la operación minera, a fin de considerarlos de manera directa en la planificación que se realiza en un sector determinado. Para este trabajo se simulará la mina El Diablo Regimiento, un nivel que cuenta con un manejo de materiales conformados por equipos LHD's en el nivel de producción, los cuales vacían a la tolva de cada uno de los 4 chancadores (uno por cada fase) que a su vez mediante un sistema de plate feeder descargan el material en un nivel de transporte que funciona por medio de correas.

En particular el realizar una simulación de un nivel de correas es algo que no se ha estudiado dentro de la División el Teniente y resulta de principal interés ser capaz de estimar las máximas capacidades productivas del nivel, considerando las fallas y mantenciones de diversos equipos tales como: LHD, chancador de mandíbulas, plate feeder y correas. Por otro lado, el realizar una buena simulación de correas permitiría dar pie a realizar la simulación de manejo de materiales del principal proyecto que tiene a futuro la división, el Nuevo Nivel Mina (NNM).

Una de las ventajas de utilizar el Software DSim para realizar la simulación es que se ha implementado con éxito en distintas minas de cielo abierto y hoy en día se encuentra desarrollando el módulo para el transporte de mineral en minería subterránea. Es una herramienta computacional que se puede usar de manera fácil y rápida, debido a que no es necesario saber programar, se utiliza específicamente en minería, puede adaptarse a los requerimientos del usuario presentando una gran flexibilidad.

Finalmente, la simulación de eventos discretos en minería permite identificar y gestionar la eliminación de aquellos tiempos en que los diferentes equipos de la mina no se encuentran operando producto de las interferencias entre niveles, que por lo general no se hace debido a que es visto como una suerte de externalidad negativa de cada nivel. De esta manera es posible hacer más rentable el negocio minero, administrando y dimensionando los recursos de manera más eficiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar y calibrar un modelo de simulación de materiales con el software DSim para un nivel de producción y de transporte intermedio utilizados en la mina El Diablo Regimiento de la Mina El Teniente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Validación Software DSim en minería subterránea para el caso de Diablo Regimiento en base al criterio de que el modelo posea menos de un 10% de error relativo en relación al tonelaje real extraído.
- Estimar la certeza de los planes contenidos en los informes P-0 y P1, que son emitidos por la Superintendencia Planificación Minera Metalúrgica de la División El Teniente.
- Identificar eventos que generan interferencia operacional, para diferentes componentes del sistema minero subterráneo.
- Identificar parámetros más relevantes dentro de la simulación para que se consideren en la realización del plan anual.

1.3. Alcances

- El modelo considera nivel de producción en el cual trabajan equipos LHD's y un nivel de transporte intermedio que funciona por sistema de correas transportadoras.
- En el nivel de producción trabajan equipos LHD's que cargan el mineral en los distintos puntos de extracción y lo trasladan al chancador de mandíbula correspondiente a ese punto.
- El nivel de transporte intermedio se compone por un sistema de correas transportadoras la cuales llevan el material desde los 4 chancadores de mandíbula a un chancador giratorio principal.
- Se considerarán los diseños del sistema minero ya establecido, sin variaciones durante el estudio.
- Las interferencias operacionales relevantes para este estudio serán las producidas por fallas y mantenciones en los equipos, generando los cuellos de botella en los distintos niveles de la operación y afectando de esa manera a los otros niveles.
- Se ocuparán los datos entregados por División El Teniente para realizar la validación del software.

1.4. Estructura de la memoria

El resto del trabajo está organizado tal y como se describe a continuación:

La sección de antecedentes incluye la literatura científica relevante publicada, además de la información encontrada en libros y tesis, incluyendo la información, tanto general de la faena donde se desarrolla la memoria, como información relacionada con el tema de memoria que sirve como apoyo para el trabajo que se realizará a lo largo de la memoria.

Posteriormente se describe la metodología que se utiliza para la formulación del modelo de simulación y de este modo, lograr cumplir con los objetivos planteados en el capítulo de Introducción.

Seguido de esto se presenta el caso de estudio, donde se describe los antecedentes de la mina estudiada, la aplicación de la metodología al caso de estudio donde se desarrolla el modelo, se definen de manera específica los alcances que considera el modelo y en general información necesaria para poder realizar el trabajo.

Los resultados obtenidos una vez que se aplica la metodología descrita anteriormente al caso de estudio tanto de la calibración y validación del modelo, como los resultados proyectados de éste.

El análisis de los principales resultados obtenidos se realiza tanto de la validación, donde se explican los criterios utilizados para calibrar el modelo, como también los análisis acerca de las consideraciones generales que posee el modelo y como este se comporta en el caso de estudio que se realizó.

En base a los resultados y análisis realizados se generan conclusiones, las cuales son acorde a los objetivos planteados al inicio del trabajo por otro lado se recomiendan los distintos pasos que se deben seguir para hacer que el modelo sea cada vez más parecido a la realidad pueda generalizarse a otros casos de estudio.

Finalmente, se muestra la lista de literatura científica publicada que se utiliza en las citas realizadas de la memoria. Y seguido de esto se exponen parte de los resultados que facilitan a la comprensión del informe en la sección de anexos.

CAPÍTULO II

2. ANTECEDENTES

En el presente capítulo se realiza una revisión bibliográfica de los principales antecedentes relevantes para poder comprender el trabajo realizado. Se parte por definir los antecedentes de la faena en la que se realizará el trabajo de memoria y específicamente el sector en el que se realizará el modelo de simulación, siguiendo por definiciones propias de la minería que incluyen las distintas etapas de planificación existentes en la industria. Por otro lado, se realiza una reseña acerca de la historia de la simulación y las diferentes metodologías que existen para desarrollar los modelos mostrando ejemplos de las simulaciones que ya se han realizado en la División el Teniente.

2.1. Antecedentes generales mina El Teniente

La mina El Teniente, es un complejo minero-metalúrgico perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO), que considera entre sus principales activos el conjunto de sectores que forman la “Mina El Teniente” con sus respectivas instalaciones productivas e infraestructura necesaria para el procesamiento de minerales de cobre y molibdeno. Es la mina subterránea en operación más grande del mundo, con un área aproximada de 6 km², una extensión vertical actual de 1 km y posee más de 3000 km en túneles. Actualmente la División El Teniente es capaz de producir 141,000 ktpd de mineral, de las cuales se tiene aproximadamente 490 kt/a de cobre fino y 10 kt/a de molibdeno que comercializa (Robles, 2016).

2.1.1. Ubicación y acceso

El yacimiento se encuentra ubicado en la Cordillera de los Andes Centrales de Chile, en la VI Región del Libertador Bernardo O’Higgins, Provincia del Cachapoal, Comuna de Machalí, en las coordenadas -34°05 norte y 70°21 oeste, a 40 kilómetros al NE de Rancagua, 72 kilómetros al SE de Santiago y a 3 km al SE del ex campamento minero de Sewell. Para llegar a las instalaciones industriales se accede por la carretera Presidente Eduardo Frei Montalva o Carretera del Cobre tal y como se muestra en la Figura 1.

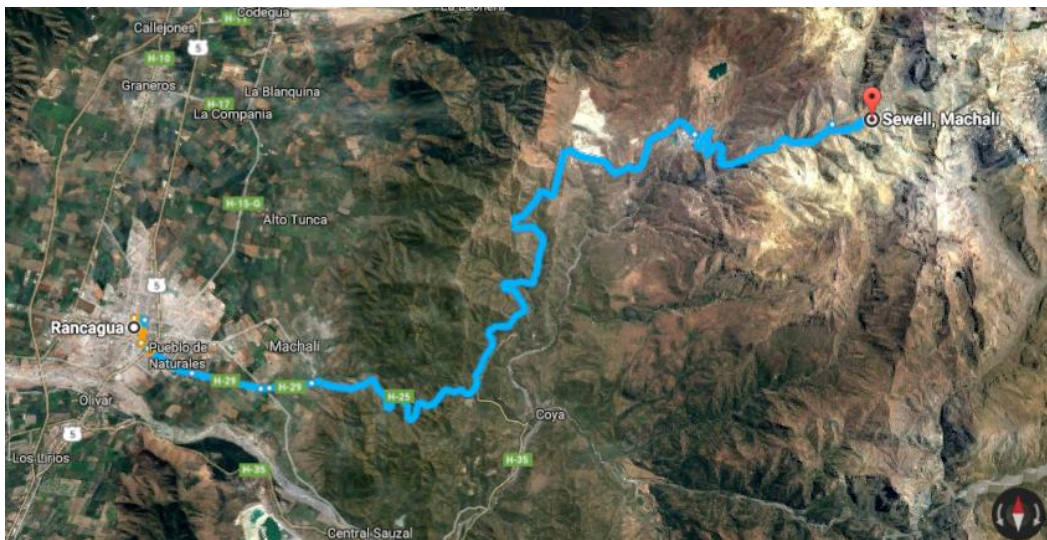


Figura 1: Ubicación instalaciones División el Teniente

2.1.2. Sectores Productivos Mina

La actual operación mina están compuestas por nueve minas subterráneas y un rajo abierto. La explotación de la mina se logra mediante métodos de hundimiento block/panel Caving, operaciones mecanizadas con LHD's, camiones correas o ferrocarriles que conducen el mineral a OP que conectan con el transporte principal de FFCC Teniente 8 que traslada el mineral a las plantas de chancado – molienda - flotación de Colón. El rajo alimenta vía camiones y OP la panta de chancado – molienda de Sewell.

En la siguiente figura se observan los niveles que actualmente están siendo explotados, además de los 2 futuros proyectos en desarrollo (Nuevo Nivel Mina).

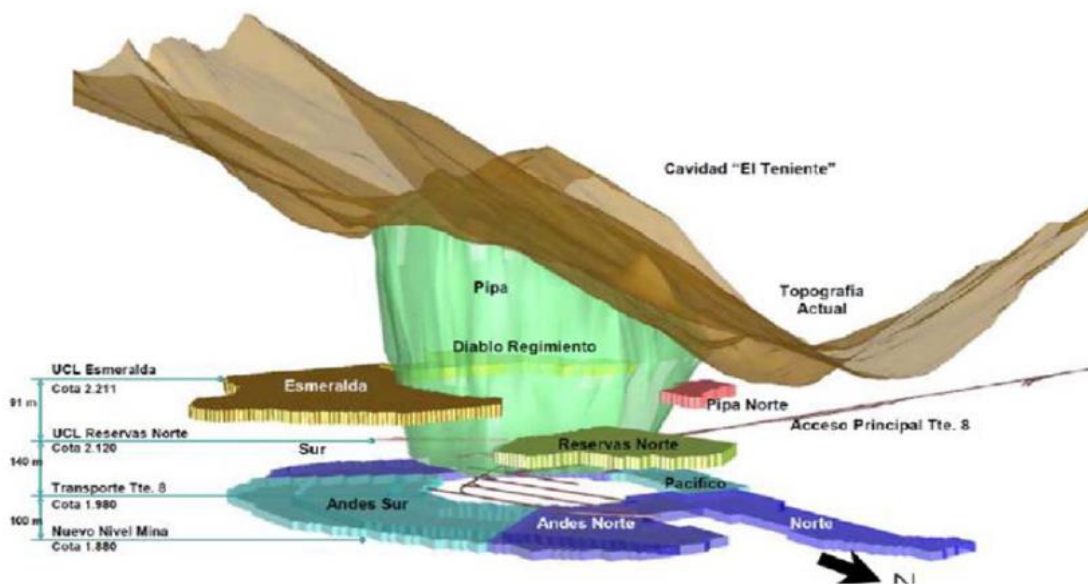


Figura 2: Niveles y cotas de las minas actuales en operación. Además de los desarrollos del Nuevo Nivel Mina (Gonzalez, 2015)

2.1.3. Diablo Regimiento

Mina Diablo Regimiento está ubicada en el extremo Sur del yacimiento, y está compuesta por 5 fases que se encuentran actualmente en producción explotadas por el método de Panel Caving, por medio de la variante Hundimiento Avanzado por Calles. Sus reservas extraíbles según PND 2015, corresponden a 66,2 Mt con una ley media de 0,823% de cobre total y 0,031 % de molibdeno. Para el año 2015 la producción comprometida es de 28.532 tpd, desde el año 2016 el perfil productivo disminuye de manera gradual hasta alcanzar un régimen cercano a 21.000 tpd entre los años 2017 y 2019. Posteriormente el ritmo decrece hasta agotar las reservas del sector en el año 2024, con 2.981 tpd.

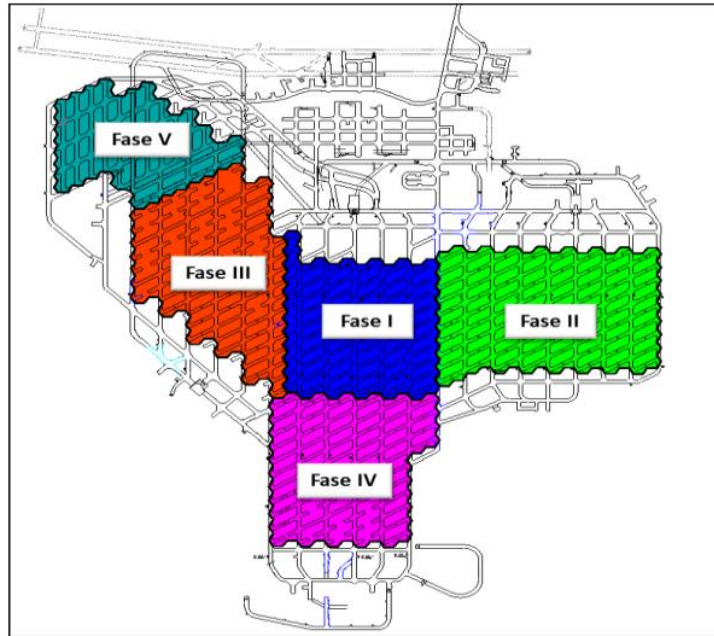


Figura 3: Ubicación Fases - Mina Diablo Regimiento

El sistema de manejo de materiales es similar al de Pipa Norte, basado en la operación de equipos LHD de 13 yd³ que alimentan vía Plate Feeder a chancadores de mandíbulas que entregan mineral bajo 8", el cual es transportado por medio de correas transportadoras hasta los piques OP 20-21, que traspasan el mineral hasta el nivel de transporte principal FFCC Ten 8 para ser transportado finalmente hacia la planta Colón. La Figura 4 esquematiza el proceso de explotación de este sector (Desarrollo, 2015).

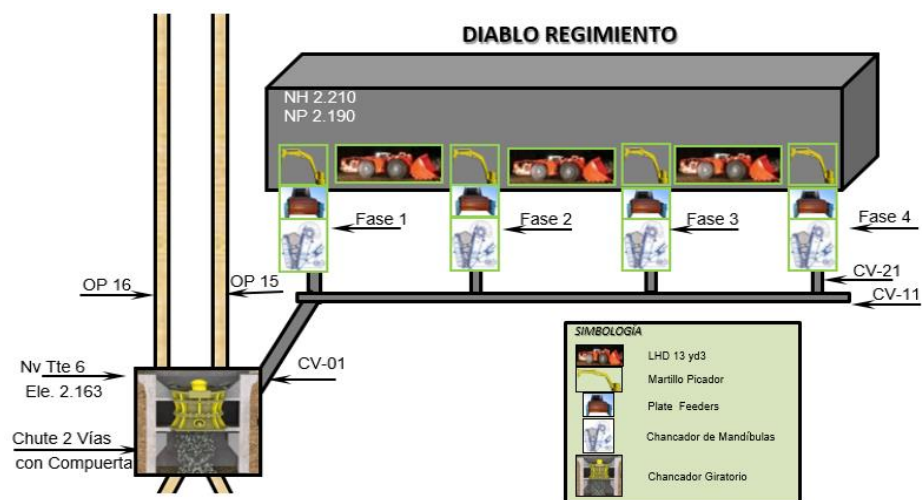


Figura 4: esquema manejo de materiales Diablo Regimiento

2.2. Planificación Minera

Las empresas mineras están obligadas a presentar a la administración un proyecto de la explotación a realizar, antes de que se obtenga de la concesión final de explotación del sector y, posteriormente un plan de labores anuales, que permite ejercer control por parte de los directivos de la compañía y por parte del estado. Estos artículos constituyen documentos bancables, necesarios para conseguir préstamos, justificar inversiones, y que en el caso de empresas que cotizan en la bolsa, inciden de manera directa en el valor de las acciones. En consecuencia, surge la disciplina de planificación minera, que se define como el proceso de Ingeniería de Minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo, alineado con los objetivos estratégicos de la corporación, sean estos maximizar el valor presente neto (VAN), el volumen total de reserva, maximizar el tiempo de explotación, minimizar el riesgo de la inversión, etc., e integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno. (Vargas, 2011).

Para tratar la incertidumbre dentro del proceso de planificación minera es que se definen los horizontes temporales de esta, definiendo así la planificación de largo, mediano y corto plazo (Troncoso, 2006).

- **Planificación de largo plazo:** define la envolvente económica, el método de explotación, ritmos de extracción, secuencias de explotación y las leyes de corte.
- **Planificación de mediano plazo:** se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo. Produce planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas. Se sustentan los presupuestos de operaciones para el año siguiente, comúnmente aproximando la capacidad productiva del sistema minero como la suma de las capacidades productivas individuales de cada punto de

extracción, que se encuentran restringidas por la denominada velocidad de extracción, que corresponde al tonelaje máximo que puede extraerse en un periodo de tiempo (normalmente días) por un determinado punto.

- **Planificación de corto plazo:** su rol más importante es la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar al largo plazo. Por otro lado, se preocupa de definir indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

2.3. Planificación División El Teniente

2.3.1. Plan Exploratorio (PEX)

Es el conjunto de escenarios de desarrollo posibles que, para distintos niveles de riesgo y restricciones mínimas, permitirán capturar el máximo de valor posible, a partir de los recursos mineros y de otra índole disponible. Los escenarios son excluyentes y abarcan todo el horizonte de vida de los recursos incorporados (vida de la mina), incluyendo además los proyectos que los sustentan, independiente del nivel de ingeniería o desarrollo.

2.3.2. Plan de Negocio y Desarrollo (PND)

Es una fracción del PEX, que con un alto grado de certeza y en el mayor horizonte de tiempo posible, se está en condiciones de comprometer ante el dueño o los accionistas, representando la mejor aproximación al valor económico o valor de mercado del negocio divisional. El PND contiene los flujos de ingresos, gastos, inversiones y financiamiento en el periodo requerido para la explotación de los recursos mineros, así como las restricciones de mercado, de recursos, de estrategia, técnicas, contractuales y de otra naturaleza.

2.3.3. Plan Anual División El Teniente

Es un subconjunto del Plan Minero, para el horizonte de un año, con un contenido similar, pero con un alto grado de detalle, análisis y certeza. El grado de detalle y análisis es mensual. Su propósito es servir de base para la construcción del presupuesto anual de la División. Se realizan varias revisiones para un mismo año en particular, la versión P-0 a mediados del año anterior, con la cual se construye el presupuesto, por otro lado, la versión P-1 a fin del año anterior, con la cual se definen los compromisos con la Corporación y los convenios de desempeño divisionales y de las áreas de la organización (Vienne).

2.4. Incertidumbre e Interferencias en la operación minera

La incertidumbre involucra a variables que son desconocidas y cambiantes, pero su incertidumbre puede ser conocida y resuelta con el paso del tiempo, eventos y acciones. Es la posibilidad de que un evento ocurra o no. Se pueden distinguir distintas fuentes de incertidumbre asociadas a la planificación minera. Estas fuentes pueden ser externas o internas. Las fuentes de incertidumbre externas son aquellas ajenas a la empresa, en donde el principal ejemplo es la incertidumbre de mercado, debido a su gran

impacto en el valor del negocio. En esta categoría también se encuentran las políticas gubernamentales y el riesgo país (Mayer & Kazakidis, 2007).

Por otro lado, las fuentes internas son aquellas relacionadas con la organización propia de la empresa y sus activos. Las fuentes internas más importantes son geológica y operacional, ya que generan un gran impacto en el beneficio económico que se puede obtener país (Mayer & Kazakidis, 2007).

En la siguiente Figura 5 se muestran las principales fuentes de incertidumbre tanto internas como externas asociadas a los proyectos mineros.

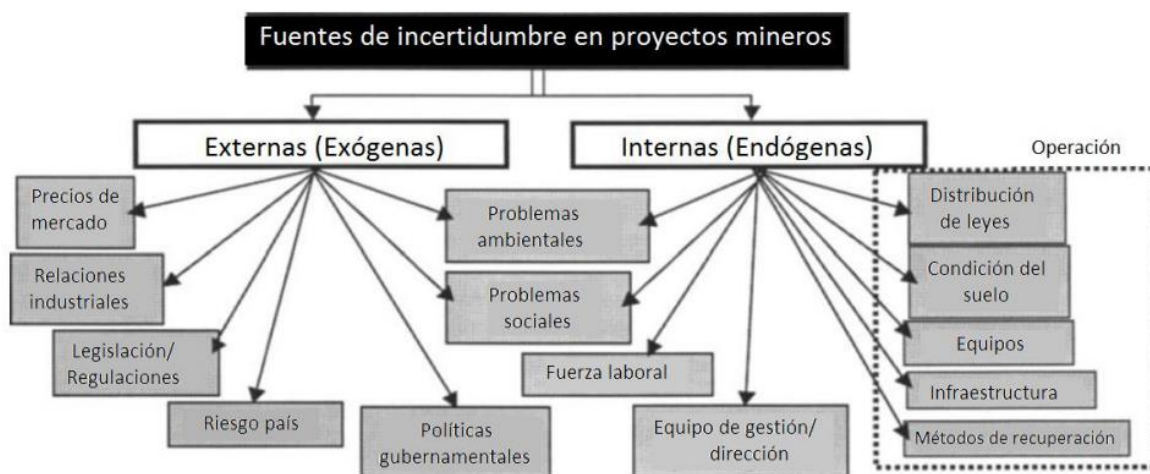


Figura 5: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros (Mayer & Kazakidis, 2007).

Además, se tiene que las interferencias son todas aquellas situaciones que generan pérdida de tiempo y que afectan al desarrollo normal de una actividad. Son aquellas que pueden ser programadas o no programadas y afectan el tiempo de trabajo efectivo.

Si bien las interferencias ocurren en todas las faenas mineras, la cantidad y el tipo de interferencias pueden llegar a ser muy distintas entre una faena y otra, esto debido a que son dependientes de las condiciones de operación (Contreras, 2016).

2.5. Simulación de Eventos Discretos

Para comenzar a hablar de simulación lo primero es hacer una como se ha definido este proceso desde sus orígenes. Es en este contexto, es que (Shannon, 1975) define la simulación como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

En esta definición no se especifica si se trata de una simulación continua o discreta, pero es necesario señalar que el presente informe se trabajara en base a la simulación de eventos discretos.

Unos años después es (Banks, 1999) se refiera a la simulación de eventos discretos, información importante y clara acerca de la simulación, la cual la define como imitación de la operación de un proceso en el mundo real o del sistema en el tiempo. Simulación implica la generación de una historia artificial del sistema y la observación de esta historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características de funcionamiento del sistema real que se representa. Ejemplificándola como una metodología de resolución de problemas indispensable para la solución de muchos problemas del mundo real, la cual se utiliza para describir y analizar el comportamiento de un sistema, preguntando "¿qué pasaría sí?" acerca del mundo real. De esta manera se definen conceptos claves dentro de la simulación tales como:

- **Modelo:** Es la representación de un sistema actual el cual debe ser suficiente complejo para responder a las preguntas planteada, pero no demasiado pero no lo suficientemente complejo.
- **Variables de estado del sistema:** son la recopilación de toda la información necesaria para definir lo que está sucediendo dentro del sistema a un nivel suficiente (es decir, para alcanzar el resultado deseado) en un punto dado en el tiempo.
- **Eventos:** es una ocurrencia que cambia el estado del sistema.
- **Entidad:** representa un objeto que requiere una definición explícita. Una entidad puede ser dinámico en el que se "mueve" a través del sistema, o puede ser estático, ya que sirve a otras entidades.
- **Atributos:** Deben ser considerados valores locales que pertenecen a esa entidad por sí sola.
- **Recurso:** es una entidad que proporciona servicio a entidades dinámicas. El recurso puede servir una o más de una entidad dinámica, al mismo tiempo, es decir, operar como un servidor paralelo.

Conocidos estos conceptos es que finalmente, (Banks, 1999) define un modelo de simulación de eventos discretos como uno en el que las variables de estado cambian sólo en aquellos puntos discretos en el tiempo en que ocurren los eventos. En estos modelos de simulación los eventos ocurren como consecuencia de los tiempos de actividades y retrasos, los cuales viene dados por distribuciones de probabilidad. Las entidades pueden competir por los recursos del sistema, posiblemente unirse a las colas para esperar de un recurso disponible.

Un año después, (Hall, 2000) define los pasos necesarios para realizar una simulación, los cuales se nombran a continuación:

- 1) Identificación del problema
- 2) Declaración de los objetivos del proyecto

- 3) Colección de preparación de los datos
- 4) Formulación y construcción del modelo
- 5) Verificación y validación del modelo
- 6) Modificación y/o refinamiento del modelo
- 7) Uso del modelo
- 8) Aplicación de resultados

También señala algunos de los beneficios que presenta la simulación, señalando que se puede proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de un sistema. Es ideal para evaluar los efectos de los cambios en los sistemas dinámicos y complejos relacionados entre sí, tales como cambios en el número o tipo de máquinas, las tasas de procesamiento, disponibilidad de la máquina y los parámetros de degradación, el flujo del proceso, la asignación de los operadores para diversas tareas, mezclas de productos o mezclas, métodos de manejo de materiales y tamaños de arsenales. La simulación puede proporcionar resultados cuando las soluciones analíticas simples, no pueden calcularse.

En la misma época (Elidio Labão, 1999) incorporan un tema importante a la hora de realizar el modelamiento de un sistema, específicamente respecto al nivel de detalle que este debe tener. En su trabajo, se dice que cuando se construye un modelo demasiado detallados y complejos, se hace más lento, difícil de entender y mantener. Junto con esto, la confiabilidad decrece, debido a que el modelo necesita una gran cantidad de parámetros de calibración, los cuales son difíciles de obtener en la realidad. Esta se refleja en la Figura 6.

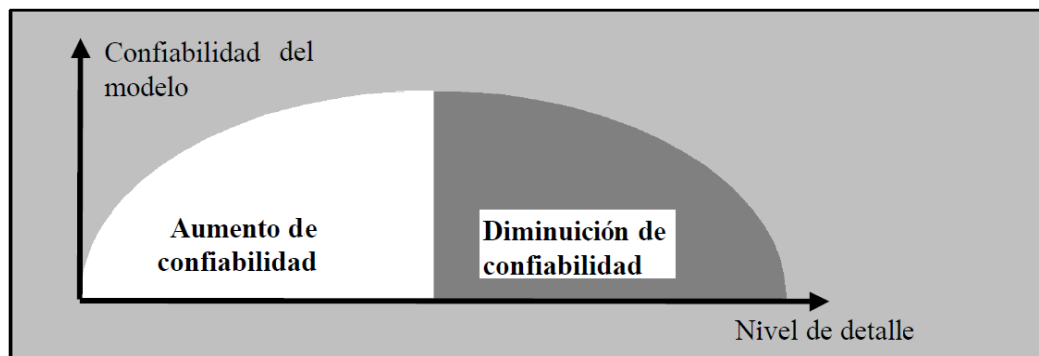


Figura 6: Confiabilidad del modelo v/s nivel de detalle

Un par de años después, (Marcelo Fioroni, 2008) afirma que existen algunos sistemas a modelar en los que no se puede evadir la simplificación de un proceso complejo sin que existan pérdidas en la precisión de los resultados. Existen casos en el que el sistema posee procedimientos que conllevan decisiones o elementos críticos, los cuales son muy importantes para el comportamiento del sistema. Por otra parte, plantea la idea de que un modelo de optimización en un modelo de simulación es un obstáculo para el modelador. Además de reconocer que en general los softwares de simulación de eventos discretos no están completamente diseñados para resolver problemas de optimización de una manera fácil y rápida.

Finalmente, ante estos antecedentes se tiene que la ventaja de estos sistemas de evaluación es que se consideran las actividades más relevantes involucradas en el proceso de carguío y transporte, desde que se extrae el mineral desde un punto de extracción, hasta su depósito final como lo puede ser un chancador o planta de procesamiento.

Junto con lo cual se presentan desventajas en este método de evaluación de agrandamiento, lo cual es precisamente el desarrollo de un sistema que sea capaz de sustentar y representar las actividades de la operación más relevantes del proceso de manejo de materiales. Además, este método presenta otra desventaja, la cual consiste en tener que caracterizar los parámetros de operación del sistema, los cuales modulan el desempeño micro del sistema en términos de tiempo y cantidades.

Bajo esta premisa es que (Manriquez, 2015) define que el objetivo de las simulaciones es intentar replicar el comportamiento de un sistema real mediante el modelamiento del comportamiento de los diferentes componentes que lo integran y sus interacciones. La simulación de procesos permite resolver cuestiones complejas para las cuales los métodos cuantitativos no son eficaces o no pueden aplicarse.

2.6. Simulaciones realizadas en División el Teniente

Respecto a lo que es la simulación de sistema de manejo de materiales subterráneo es que el trabajo de (Manzur, 2015) realiza la simulación del manejo de materiales de una mina subterránea, explotada por el método de Block/Panel Caving, la cual incluye un nivel de Producción donde los LHD's llevan el mineral desde puntos de extracción a piques de vaciado, luego pasa a un nivel de transporte intermedio en el cual el mineral es recibido por camiones y estos lo envían a hasta piques principales que llegan al nivel de transporte principal donde Ferrocarriles mueven el mineral. A partir de la simulación se determina su producción, el comportamiento de sus componentes y el impacto en la planificación, considerando la incertidumbre operacional. La simulación se realizó con el software Promodel.

Los principales resultados que se obtuvieron en las simulaciones fueron producción promedio fue de 29.302 toneladas por día, un 25% menor que la indicada por el plan minero (39.000 toneladas). y como principales conclusiones se tiene que se puede aumentar la eficiencia del sistema minero agregado por niveles, disminuyendo tiempos muertos producto de las interferencias operacionales que se producen entre los niveles debido al trabajo independiente de éstos.

En el trabajo se cuenta con varios datos útiles que fueron considerados para la simulación, dentro de los cuales los más importante y relevantes de destacar son los criterios físicos y de decisión que se describen a continuación.

2.6.1. Criterios físicos

Estos corresponden a los criterios con que funcionan diferentes equipos o lugares de un sistema, y además delimitan el tránsito de las entidades.

- Solo puede transitar un LHD por calle.

- Los puntos de extracción tienen un límite diario de producción de mineral, luego de eso no se puede seguir extrayendo mineral de dicho punto hasta el siguiente día.
- Los equipos LHD y camiones tienen mantención programada cada 50 horas, la mantención dura 4 horas y durante ese tiempo el equipo no puede operar.
- Todos los equipos de la mina al momento de realizar la operación de carguío, se cargan a máxima capacidad.

2.6.2. Criterios de decisión

En esta sección se definirán los criterios con que se toman las decisiones dentro del sistema, normalmente son decisiones humanas, las cuales se deben modelar pensando en un modelo de simulación.

- La asignación de un equipo LHD a una determinada sub-calle (grupo de puntos de extracción que vacían al mismo pique) será impuesto inicialmente, el equipo no puede abandonar esa sub-calle hasta que se cumpla la extracción máxima diaria o el pique correspondiente este lleno. Luego de esto continua con la sub-calle siguiente y así sucesivamente.
- Si todos los piques se encuentran llenos el LHD se detiene a esperar a que alguno se desocupe, dirigiéndose al primero que lo haga siempre y cuando la extracción diaria de los puntos de extracción asociados a ese pique lo permita.
- En el caso de que la producción máxima para cada sub-calle se alcance, el LHD debe esperar hasta el próximo día, donde podrá extraer mineral nuevamente hasta alcanzar dichos límites.

2.6.3. Criterios de operación

Estos criterios están asociados a los casos en que se detiene la operación.

El único criterio de operación asociado a este ítem es el momento en que se produce el cambio de turno, 45 minutos antes y 45 minutos después de ocurrido el cambio no estarán en condiciones de ser operados los equipos LHD y camiones.

2.6.4. Parámetros de entrada

- Tonelaje máximo diario extraíble por punto de extracción.
- Capacidad de LHD, Camión y tren
- Capacidad de los piques de traspaso
- Tiempo entre mantenciones de los LHD y camiones
- Cantidad y tiempo de fallas de equipos
- Sistema de mantenciones del tren
- Tiempos de ciclo para LHD, camión y tren
- Cambio de turno y tiempos de pérdidas operacionales que esto implica

2.6.5. Variables de salida

- Producción del sistema minero
- Disponibilidad y Utilización de equipos
- Distribución de los tiempos en los equipos
- Porcentaje de tiempo en que los piques se encuentran vacíos, parcialmente llenos y llenos.

Por otro lado, es importante conocer los avances que ha tenido el software DSim en minería subterránea, frente a lo cual se presenta a continuación el trabajo desarrollado por (Salazar E. S., 2015), el cual consistió en realizar una simulación del nivel de transporte del sector Pacifico Superior estando en régimen (años 2018 y 2019). Dicha simulación había sido realizada también por la empresa JRI Ingeniería S.A. (JRI) el año 2014 mediante una plataforma de simulación comercial, por lo cual el trabajo tiene como objetivo comparar los resultados de ambas simulaciones.

En la siguiente imagen se ilustra el sistema de manejo de materiales que se simuló.

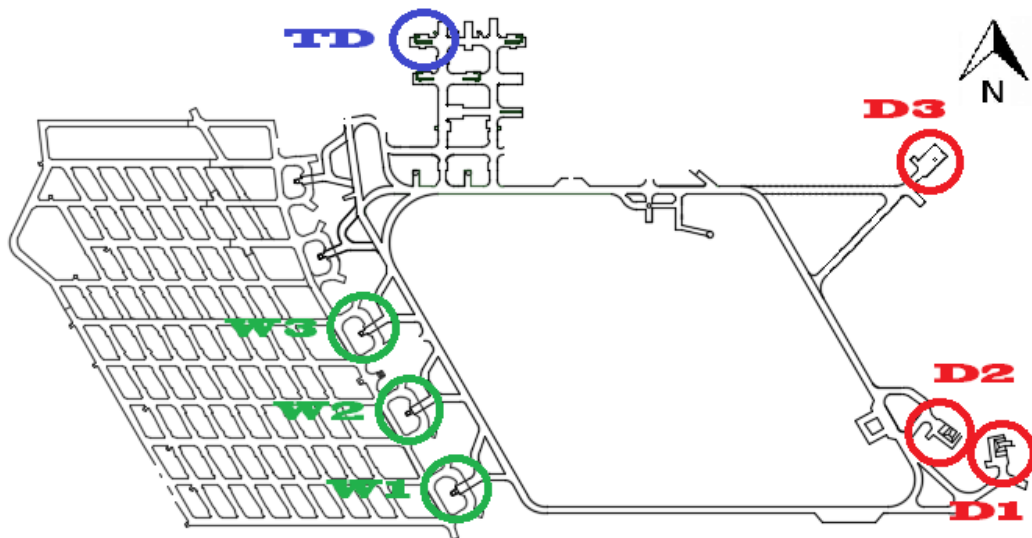


Figura 7: Plano del nivel de producción y el nivel de transporte intermedio.

En la figura se observa que los puntos verdes corresponden a puntos de traspaso de material, los rojos son los puntos de descargas u OP mientras que el azul se muestra el taller.

A continuación, se detalla con mayor detalle los elementos del modelo que se consideraron:

Los diferentes elementos considerados en la simulación son los siguientes:

- **Puntos de traspaso o carga de mineral:** Se modelan como lugares fijos en donde interactúan los LHD y los camiones. Dado el caso planteado, las calles están asociadas a LHD, estos a puntos de traspaso y estos últimos asociados a

puntos de descarga, ingresando la prioridad del OP. Cada punto tiene asociado un tiempo de acuatamiento, tiempo de descarga y producción de material variable.

- **Puntos de descarga u OP:** Se modelan como lugares fijos en donde los camiones descargan el material. Cada punto tiene asociado un tiempo de acuatamiento y descarga variable.
- **Taller:** Se modela como lugar fijo en donde los camiones hacen sus detenciones por motivo de mantenciones hasta cumplir con el tiempo de mantención asociado al camión.
- **Flota de camiones:** Se presentan como individuos móviles que conectan a los puntos de traspaso y a los OP del sistema del Nivel Transporte Intermedio. Las velocidades y tiempo de mantención pueden ser modeladas con parámetros variables, mientras que las detenciones en bifurcaciones de tramos son de carácter fijo, al igual que la cantidad de veces en que se deben hacer mantenciones, las que están asociadas a la duración del turno. La capacidad de los camiones puede ser modelada variable en el tiempo.
- **Red de caminos de los camiones:** Se presentan como la estructura que conecta a los puntos de traspaso y los puntos de descarga a través del tránsito de camiones. Estos se definen por tramos, los cuales están limitados por las bifurcaciones del camino.

Los datos considerados para realizar la simulación se presentan a continuación, donde gran cantidad de éstos fueron recogidos de las simulaciones realizadas por JRI.

Tabla 1: Parámetros de simulación Pacifico Superior

| Ítem | Valor | Unidad |
|---|-------|-----------------|
| Camiones | | |
| Flota | 5 | unidades |
| Carga efectiva | 52 | ton |
| Tiempo aculatamiento | 20 | s |
| Tiempo descarga | 2 | min |
| Tiempo carga | 5 | min |
| Velocidad vacío | 20 | km/hr |
| Velocidad lleno | 10 | km/hr |
| Detención en intersecciones ¹ | 10 | s |
| Disponibilidad total | 70 | % |
| Otros | | |
| Turnos | 3 | turnos/día |
| Tiempo entre turnos | 60 | min |
| Volumen balde LHD | 13 | yd ³ |
| Ciclos LHD por camión | 4 | ciclos/camión |
| Capacidad por punto de carga ² | 6000 | tpd |
| Simulación | | |
| Tiempo de simulación | 1440 | min |
| Replicas | 30 | unidades |

2.7. Simulaciones de eventos discretos de correas transportadoras

Debido a que en el caso de estudio elegido existen correas transportadoras que trasladan el mineral, es necesario hacer una revisión de los diferentes trabajos que se han realizado simulación de eventos discretos que incluyen este manejo de materiales.

En primer lugar (Gomez & Correa, 2011) realizan la simulación de un caso de estudio en el que se representa un patio de almacenamiento de una empresa de escala mediana de minería (explotaciones con volúmenes entre 800 mil y 2.5 millones ton por año, tecnificación intermedia de las operaciones y desarrollos principales de explotación), la cual requiere configurar las condiciones de operación de una banda transportadora que permite trasladar el carbón desde la zona de almacenaje hasta el despacho donde se carga en un camión. La metodología utilizada para el desarrollo del modelo se muestra en la Tabla 3.

El experimento considera que la problemática del patio de almacenamiento es el manejo del carbón de manera manual, por lo cual, el uso de bandas transportadoras convencionales conllevaría al aumento de la eficiencia y eficacia. Para diseñar la banda

¹ El tiempo de espera en intersecciones fue calculado como un promedio ponderado entre las intersecciones en que el camión realmente debe detener y las que no, considerando un tiempo de espera de 15 segundos en cada detención.

² Restricción activa para simulaciones tipo B

transportadora para el traslado del carbón de la posición de almacenamiento al despacho, se consideran los factores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Factores y niveles para la simulación de bandas transportadoras.

| Factores | Niveles | |
|--|----------|----------|
| Longitud de la banda(m) (A) | | |
| Determina la distancia que permite trasladar el carbón desde la posición de almacenamiento hasta la zona de despacho. | 700 m | 1000 m |
| Velocidad(m/min) (B) | 40 m/min | |
| Permite establecer el tiempo que se gasta el carbón durante el recorrido en la banda transportadora. Su velocidad puede ser determinante en la eficiencia y eficacia | | 80 m/min |
| Capacidad de transporte(Ton/hora) (C) | | |
| Cantidad de carbón que se puede trasladar en la banda transportadora | 1 Ton | 3 Ton |

Fuente: Elaboración propia

Como variable para medir los resultados de la experimentación que apoyan las decisiones de diseño de la banda transportadora, se selecciona el tiempo promedio en minutos del traslado del carbón desde la posición de almacenamiento hasta el despacho.

Tabla 3: Metodología de simulación aplicada a bandas transportadoras

| |
|---|
| <i>5.1 Descripción de la empresa</i> |
| Se describen las características de la empresa, el sistema logístico, operaciones y recursos del patio de almacenamiento |
| <i>5.2 Identificación y exposición del problema</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> Se identifica y define un problema, incluyendo un planteamiento claro y aceptable Se establecen objetivos del experimento que generalmente es el diseño o mejoramiento de la operación de la banda transportadora en el patio de almacenamiento. |
| <i>5.3 Elección de los factores y niveles</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> Se identifican y definen los factores que influyen en el desempeño de la banda transportadora en las operaciones del patio de almacenamiento de la empresa minera. Para cada factor que afecte el desempeño de la banda transportadora, se deben definir los niveles, los cuales, establecen sus posibles valores La identificación de estos factores, niveles y rangos que intervienen en el experimento generalmente requiere, no sólo de un conocimiento teórico de las variables que afectan, sino también práctico del proceso |
| <i>5.4 Selección de la variable respuesta</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> Esta variable permite medir el desempeño, la eficacia o eficiencia de la banda transportadora en el patio de almacenamiento, permitiendo comparar las alternativas y apoyar las decisiones de diseño o mejoramiento. Para medir el desempeño de la banda transportadora se puede considerar como variable respuesta el tiempo de operación o toneladas que se manipulan en un periodo de tiempo. |
| <i>5.5 Elección del diseño experimental</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> Este paso puede ser o no sencillo, dependiendo de la adecuada identificación de la variable respuesta, factores y niveles que se consideran en el momento de planear el experimento para la banda transportadora. Para elegir el diseño es necesario considerar el tamaño de la muestra (numero de replicas), la selección del orden de corridas para los ensayos experimentales y determinar si existen o no formación de bloques u otras restricciones en la aleatorización que afecten el diseño o mejoramiento de la banda transportadora. |
| <i>5.6 Realización del experimento</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> En esta etapa se planea, organiza el experimento, además, se ejecutan las diferentes corridas definidas. Inclusive, es sugerible realizar pruebas piloto, para determinar el grado de error y "comprobar" la validez de la herramienta de medición. En esta etapa se realiza y valida el modelo de simulación discreta, que representa la banda transportadora sobre la cual, se modifican las diferentes combinaciones de tratamientos de los factores con sus respectivos niveles en estudio para la aplicación en ambito minero |
| <i>1.7 Análisis estadístico de los datos</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> Se realiza un análisis de los datos obtenidos de la experimentación con el fin de realizar conclusiones que permitan dar respuesta a los objetivos planteados Normalmente se utiliza software estadístico como Minitab o Statgraphics para realizar dicho análisis, inclusive se emplean para la selección del tamaño de la muestra. Se debe considerar el uso de métodos gráficos que permiten realizar un análisis rápido y eficiente para interpretar resultados. Es necesario realizar análisis de residuos y la verificación de los supuestos del modelo para verificar que sea adecuado. |

La estructura de la etapa cubre aspectos como estructura de datos, plan de experimentación y ejecución de los experimentos a través de un modelo de simulación discreta desarrollado en SIMIO SIMULATION ®. La estructura de datos que se utiliza en el diseño de experimentos es del tipo Y_{ijkn} representa cada una de las observaciones que conforman el experimento, donde i es el factor longitud de la banda (A), j al factor velocidad (B), k capacidad de transporte (C) y n al número de las observaciones.

Los siguientes aspectos que considera el modelo son los siguientes:

Entidad

Pedidos de carbón de 10 a 12 Ton, lo cual, es la carga que maneja la empresa en promedio durante el traslado de la posición de almacenamiento al despacho.

Variables

- T traslado: Tiempo promedio de traslado del carbón de la posición de almacenamiento al despacho medido en minutos.
- Como valor de referencia se asume que el traslado manual actual del carbón en 15 metros, se distribuye una uniforme (10, 15) minutos.

Parámetros

- TLL: Tiempo entre llegadas para el carbón a trasladar, se asume que llega un pedido para trasladar cada hora.
- T cargue: Tiempo del cargue del carbón a la banda transportadora (segundos o minutos). En el presente modelo, se asume una uniforme (9, 10) minutos.
- T alistamiento: Tiempo de alistamiento de la banda y la actividad de traslado. En el presente modelo, se asume que es una constante 4 minutos.

Una vez realizadas las simulaciones se procede a realizara un analisis detallado de los resultados obtenidos, donde la configuración de los niveles de los factores longitud y velocidad de la banda transportadora, con el fin de reducir el tiempo promedio de traslado del carbón entre el patio de almacenamiento y despacho. A partir del gráfico de interacciones dobles (Figura 8), se tiene que diseñar una banda de 700 m con una velocidad 80 m/min, el cual, conlleva a obtener un tiempo de 22 minutos. Otra alternativa, es diseñar la banda de 1000 m obteniendo un tiempo promedio de 24 minutos. Otra conclusión, importante que se obtiene, es que el factor capacidad de carga, no afecta el tiempo por lo cual, se pueden reducir los costos de adquisición.

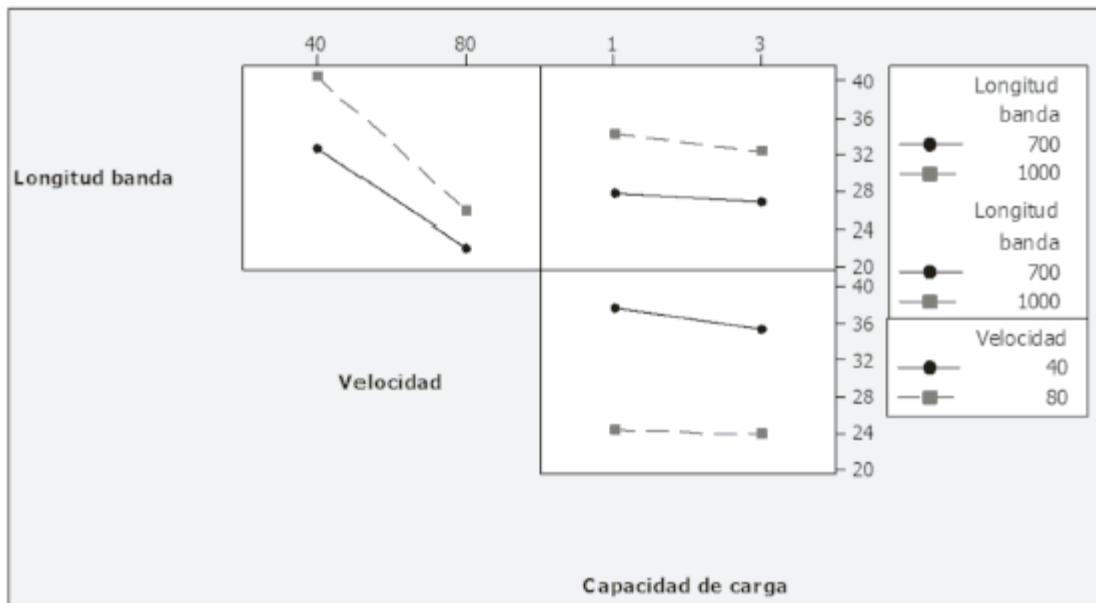


Figura 8: Gráfico de interacciones de los factores: Longitud, velocidad y capacidad de carga de la banda transportadora.

Uno de los principales resultados del artículo, es el enfoque metodológico de utilizar la técnica estadística de diseño de experimentos y simulación discreta orientada a objetos en el diseño o mejoramiento de bandas transportadoras como equipo de manejo de materiales en el patio de almacenamiento, lo cual, puede contribuir a tomar decisiones que mejoren la eficiencia y eficacia del proceso logístico soportado en el uso de técnicas cuantitativas.

En segundo lugar (Cerde M. A., 2016) realiza el su trabajo con el fin de implementar un modelo numérico, a través del Método de Elementos Finitos, que permita determinar y analizar las cargas transientes presentes en la correa C-01 del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea de Codelco, enfocado principalmente en las condiciones de arranque y parada, validando sus resultados con lo entregado por el fabricante Takraf Tenova.

para poder realizar el cálculo de la fuerza motriz necesaria en operación transiente, es necesario conocer las características de la correa transportadora, tanto sus dimensiones como capacidad, propiedades de la cinta, de los polines, del tensor gravitatorio, entre otros. Las características del material transportado, la correa y los factores estáticos considerados para los cálculos iniciales se muestran en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente.

Tabla 4: Características del material transportado por la correa de la publicación

| Característica | Valor | Unidades |
|---|--------|----------------------|
| Densidad del mineral de carbón ρ_m | 850 | [kg/m ³] |
| Ángulo de sobrecarga ϕ_S | 20 | [°] |
| Área de la sección transversal A_m | 0,1571 | [m ²] |
| Masa por unidad de largo m'_m | 133,54 | [kg/m] |

Tabla 5: Características de la correa de la publicación

| Característica | Valor | Unidades |
|--|---------|-------------------|
| Largo de cabeza a cola L_c | 1.000 | [m] |
| Capacidad nominal Q_n | 2.500 | [t/h] |
| Velocidad nominal de la cinta v_c | 5,2 | [m/s] |
| Módulo de Young de la cinta E_c | 340,917 | [MPa] |
| Ancho de la cinta B | 1.200 | [mm] |
| Resistencia nominal por unidad de largo k_N | 500 | [N/mm] |
| Área de la sección transversal de la cinta A_c | 0,01235 | [m ²] |
| Masa de la cinta por unidad de largo m'_c | 14,28 | [kg/m] |
| Masa de los polines por unidad de largo, parte carga m'_{pc} | 14,86 | [kg/m] |
| Masa de los polines por unidad de largo, parte retorno m'_{pr} | 7,72 | [kg/m] |
| Masa del tensor gravitacional m_t | 5.200 | [kg] |

Tabla 6: Coeficientes y factores de la correa de la publicación

| Característica | Valor | Unidades |
|--|-------|----------|
| Coefficiente de fricción entre la cinta y la polea motriz μ_{cp} | 0,35 | - |
| Ángulo de contacto entre la cinta y la polea motriz α_w | 180 | [°] |
| Coefficiente de fricción artificial f | 0,018 | - |
| Coefficiente de resistencias secundarias C_r | 1,09 | - |
| Eficiencia de empalme de la cinta η_{splice} | 0,8 | - |
| Factor de seguridad mínimo en operación transiente S_A | 5,4 | - |
| Factor de seguridad mínimo en operación estacionaria S_B | 8,0 | - |

El modelo también considera la aplicación del Método de Elementos Finitos a la correa considerada. Para ello se discretiza la cinta en 20 elementos de igual longitud, de los cuales 10 se consideran en el lado carga y 10 en el lado retorno. Como se muestra en la Figura 9.

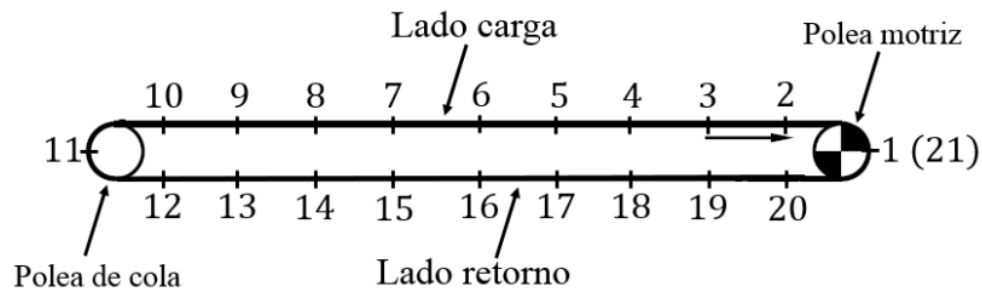


Figura 9: Numeración de nodos en la discretización de la cinta.

Una vez discretizado el modelo se efectuó un estudio sobre la influencia del paso de tiempo utilizado en los resultados de las simulaciones para estudiar la convergencia de la solución. Se fijó un criterio en este trabajo, el cual tolera un 0,1% de error relativo máximo respecto a la solución dada por el paso temporal anterior, considerando solamente el desplazamiento y la velocidad, debido a que en el caso de la aceleración se muestran errores relativos elevados y poco representativos. Con esto, se observó que a partir del paso temporal $\Delta t = \frac{t_{cr}}{100} = 2,3 * 10^{-3}$ el error de la solución en desplazamiento y velocidad de la cinta con respecto a la solución del paso anterior es menor al 0,1% que establece el criterio.

El modelo realizado en lenguaje MATLAB arrojó resultados satisfactorios, luego de ser contrastado con la publicación científica considerada. Sin embargo, vale la pena recordar que para obtener estos gráficos se realizó un ajuste a la rigidez del sistema, debido a un posible error en la publicación científica al calcular el largo de cada elemento. Pese a la utilización de este ajuste, se destaca que el código está bien implementado, es decir, que los cálculos se realizan de buena manera. Con esto se pudo validar el modelo MATLAB realizado.

Luego se implementó el modelo en la correa C-01 del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea de Codelco. En los cálculos realizados se utilizó un paso temporal igual a una centésima parte del paso temporal crítico $\Delta t = \frac{t_{cr}}{100} = 2,3 * 10^{-3}$, para cumplir con el criterio antes establecido, obteniendo errores relativos bajo el 0,1% respecto a las soluciones anteriores y se eligió arbitrariamente el método de Newmark, debido que para ese valor del paso de tiempo los tres métodos entregan valores similares. Con esto se evaluó el caso arranque y el caso parada de la correa.

2.8. Elementos que se incluyen en la simulación

Para efectos de este trabajo, se simulará un nivel de producción compuesto por LHD's, los cuales extraen mineral desde puntos de extracción y lo transportan a un punto de vaciado donde está ubicado un chancador que mediante un sistema Plate Feeder pasa a un circuito de correas transportadoras, que finalmente vierten el mineral a un pique

de traspaso. A continuación, se entrega una reseña de cada uno de los componentes del sistema de materiales recién descritos con el objetivo de que se tenga una idea general de sus funciones. Estos elementos posteriormente serán ingresados a la simulación.

2.8.1. LHD

Los LHD aparecen de la evolución de los equipos de carguío para interior mina, que basados en el concepto de cargar, transportar y descargar surgen como la solución más efectiva para compatibilizar Rendimiento – Capacidad – Maniobrabilidad. Esta última se ve limitada principalmente por la necesidad de minimizar el desarrollo de infraestructura dentro de la mina, convirtiéndose en un equipo adaptable a los sistemas de explotación de Panel Caving que funcionan con configuraciones en el Nivel de producción del tipo malla Teniente.

Este equipo permite realiza el ciclo de carguío, transporte en distancias mayores (200 m hasta 300 m) y descarga en un tiempo menor que sus antecesoras palas cargadoras y auto cargadoras, lo que significa un mayor rendimiento de la tarea.

Es una máquina dotada de un balde de grandes dimensiones, la cual permite transportar el material. Una de las principales características en mecánicas es que es articulado centralmente permitiéndole el giro en pequeños radios lo que a su vez involucra un ahorro en la construcción de galerías. El LHD puede descargar sobre piques de traspaso o sobre el suelo para que otro equipo continúe con el carguío, también está capacitado para cargar camiones de bajo perfil y camiones convencionales de altura adecuada.



Figura 10: Imagen ilustrativa LHD (Inc, 2013)

2.8.2. Chancado

El chancado es la primera parte de los procesos de conminución. Generalmente es una operación en seco y usualmente realizada en 1, 2 o 3 etapas.

Las colpas del mineral proveniente de las minas pueden ser tan grandes como 1,5 m y el producto final requerido variará, según sea la aplicación de que se trate, entre 20 cm y 7 mm.

2.8.2.1. Chancador de Mandíbulas

Los chancadores de mandíbula son maquinaria de trabajo pesado, usados para reducir de tamaño al mineral proveniente de la mina (run-of-mine), hasta un tamaño apropiado para su transporte y posterior tratamiento. Estos equipos son operados siempre en circuito abierto, con o sin parrillas separadoras previas. Se utilizan para realizar el chancado primario por lo general.

Éstos operan comprimiendo las rocas entre dos placas (mandíbulas), una fija y la otra móvil, montadas en ángulo agudo. La mandíbula móvil está pivoteada y se mueve como un péndulo contra la que está fija.

El mineral es apretado y liberado en la medida que avanza por la cavidad entre mandíbulas, hasta que cae por la abertura de descarga hacia un sistema de Plate Feeder, el cual se encarga de vaciar el mineral a la correa transportadora.

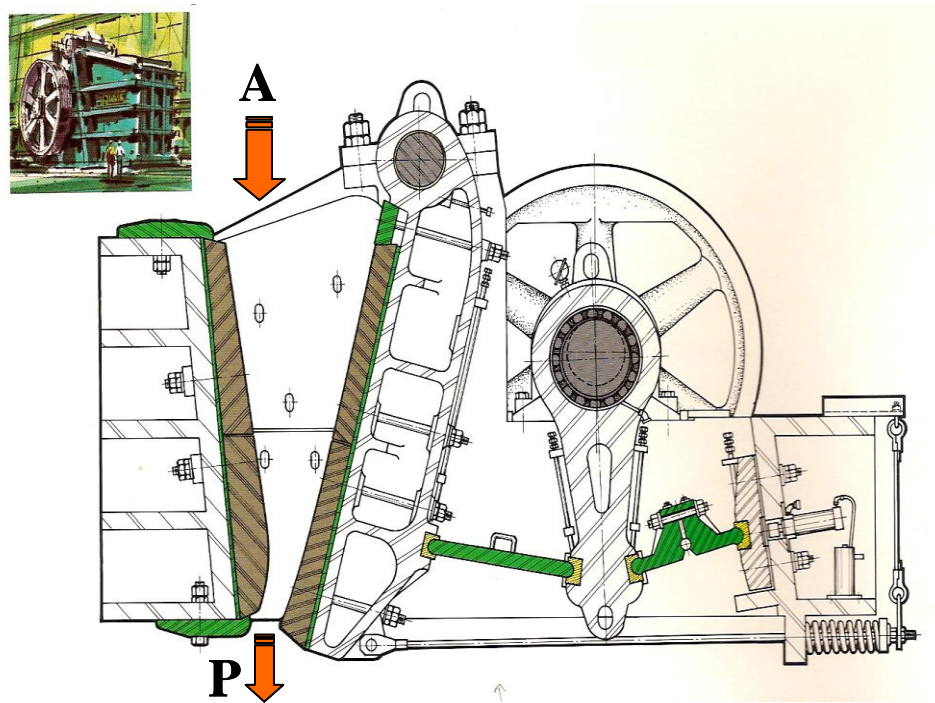


Figura 11: Esquema general Chancador de Mandíbulas (Casalli, 2014)

2.8.3. Correas transportadoras

La correa transportadora es un equipo de transporte continuo que permite el traslado del material, su principal limitante es la granulometría del material a transportar, ya que por el tamaño de la banda no es posible el transporte de rocas de gran tamaño. Con la correa se pueden vencer pendientes significativas (20% y más), pudiéndose pasar por sobre terrenos con agua, lo cual es un punto favorable respecto a los camiones, por ejemplo. Por lo general a grandes distancias se tiene que las correas son más

competitivas que los camiones, llegando a ser más aplicables a medida que las distancias y pendientes aumentan. Es común encontrar correas en minería subterránea cuando algunas operaciones de chancado y molienda se realizan dentro de la mina.

La correa en sí, consta de un recubrimiento de goma o caucho resistente al calor, abrasión, químico y aceites, que a su vez puede o no contar en su superficie con relieves (rugosidad) para aumentar la adherencia del material a la cinta (Le-Feaux).



Figura 12: Correas Transportadoras (Le-Feaux)

El sistema de una correa transportadora cuenta con un conjunto de elementos que se detallan a continuación-

2.8.3.1. *Poleas Motrices*

La polea motriz es la que le entrega la energía al sistema para que la correa se mueva. El diámetro debe ser el adecuado para evitar que el enrollamiento frecuente de la cinta la fatiga y además que la presión que soporta la cinta sobre la polea no sea excesiva. Un mayor diámetro permite que la deformación de la cinta sea mínima evitando la fatiga, pero a la vez aumenta la presión de la cinta sobre el rodillo, lo cual es desfavorable. La polea por lo general se encuentra recubierta de caucho, con el fin de mejorar el coeficiente de adherencia de la cinta y la polea.

2.8.3.2. *Rodillos de soporte*

Los rodillos permiten que la correa se deslice por la estructura base de ella, haciendo que la cinta no se someta a grandes roces a medida que se desplaza. Los rodillos de transporte o superiores son los que sostienen a la cinta cargada (desplazamiento superior) y los de retorno guían la cinta descargada por la parte inferior del sistema y se encuentran 2 o 3 veces más espaciados que los superiores.

La inclinación de los rodillos son los que le dan la capacidad carga (transporte) a la cinta, ya que al curvarse generando una forma de artesa en la cual el material se deposita.

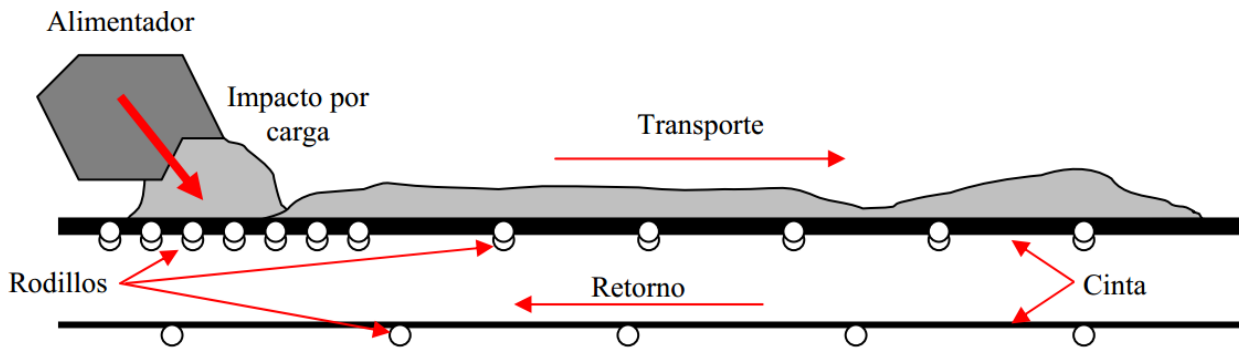


Figura 13: Esquema distribución de rodillos en una correa (Le-Feaux)

2.8.3.3. Capacidad de la Correa

Otro parámetro importante de la correa es su capacidad, la cual depende de los siguientes factores:

Ancho de la cinta

Mientras mayor sea, mayor será la capacidad, se estipula que su dimensión deberá ser el doble del máximo tamaño del material a transportar siempre y cuando este no represente más del 15% del total del material (si el material es irregular), si tenemos material regular el ancho de la cinta deberá ser 4 veces mayor que el tamaño máximo, agregándole 15 a 20 centímetros a cada lado por efectos de seguridad (independiente de la regularidad del tamaño).

Velocidad de la cinta

Deberá ser acorde con la velocidad de carga de la correa, para permitir una distribución uniforme de la carga a lo largo de la cinta (evitando discontinuidad o sobrecargado de la cinta).

2.9. Distribuciones Fallas

A continuación, se muestra el formato de los datos entregados por la superintendencia de mantenimiento en base a los cuales se obtuvieron las distribuciones de fallas de los equipos simulados.

Tabla 7: Fallas de correas y chancadores

| Descripción | Denom.ubic.técnica | IniAvería | FinAvería | DurParada [hr] | Stat.sist. |
|---|--------------------------------------|------------|------------|----------------|------------|
| EQAC CORTE CORREA BF02 | SISTEMA DE TRANSPORTE BF02 | 23.12.2014 | 24.12.2014 | 16.25 | MECE |
| EQAC REPARACION DE CORREA CV-41 | CINTA TRANSPORTADORA CV41 | 17.01.2015 | 17.01.2015 | 3.75 | MECE ORAS |
| EQAC ENGRAMPE DE CORREA BF-04 FASE 3 | SISTEMA DE TRANSPORTE BF04 | 24.01.2015 | 24.01.2015 | 2.42 | MECE ORAS |
| EQAC CORTE CORREA BF01 FASE 1 | SISTEMA TRANSPORTE CT BF-01 D/R-I | 04.03.2015 | 05.03.2015 | 18.75 | MECE ORAS |
| EQAC BLOCK DE CARGA DE TLF5 DAÑADO | SISTEMA LEVANTE GRUA #02 S.CH.D/R-II | 06.04.2015 | 06.04.2015 | 1 | MECE ORAS |

Tabla 8: Fallas de equipos LHD

| SECTOR | FECHA | TURNO | EQUIPO | HORA_INICIO | HORA_FIN | FALLA | DESC_FALLA |
|-----------|-----------------|-------|--------|-------------|----------|-------|------------|
| DR | 02-01-2015 0:00 | B | 824 | 16:53:58 | 0:00:01 | Falla | MECANICO |
| DR | 20-01-2015 0:00 | A | 822 | 08:48:32 | 0:00:01 | Falla | FALLA |
| DR | 27-10-2015 0:00 | A | 807 | 13:38:18 | 2:21:42 | Falla | ELÉCTRICO |
| DR | 06-08-2015 0:00 | B | 810 | 20:07:20 | 2:21:43 | Falla | NEUMATICO |
| DR | 17-09-2015 0:00 | B | 822 | 22:54:30 | 0:27:33 | Falla | NEUMATICO |
| DR | 27-09-2015 0:00 | A | 823 | 12:54:11 | 1:46:10 | Falla | MECÁNICO |

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En esta sección se muestran los pasos que se utilizarán para la realización del trabajo de memoria, donde se creará un modelo de simulación de manejo de materiales que incluye un nivel de producción donde trabajan equipos LHD's y un nivel de transporte intermedio de correas. La herramienta computacional que se usará para crear el modelo será el simulador de eventos discretos DSim.

La metodología propuesta se basa en la elaborada por (Banks, 1999), que incluye 9 etapas en las que se describen el desarrollo de un modelo de simulación de manera general. Dado el caso de estudio que se presenta, la metodología que se describirá está orientada al manejo de materiales de una mina explotada por Block/Panel Caving.

En el siguiente esquema se muestran las distintas etapas de la metodología, seguido de una descripción de cada una de ellas.

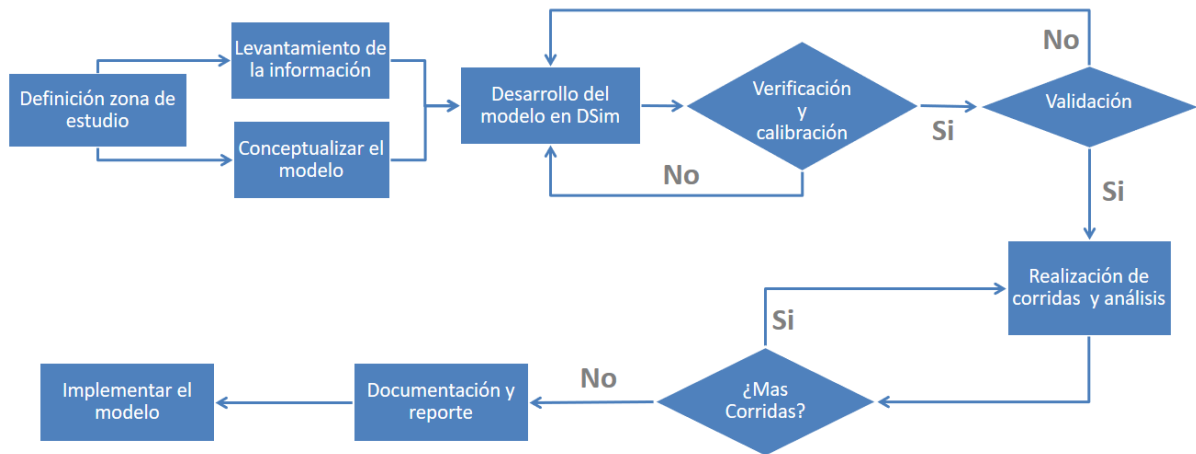


Figura 14: Metodología

1.5. Metodología de la investigación

La metodología de trabajo utilizada en este trabajo consta de las siguientes etapas:

1) Recopilación de información para la metodología propuesta, esto es:

- Análisis de los rendimientos actuales de la producción de Diablo Regimiento en el periodo de 3 meses del año 2015, 1 mes para la calibración y dos meses para la validación.
- Estudio de las aplicaciones de modelos de simulación enfocados a producción.
- Entrevistas con personal que se desempeña en el área de operaciones para recopilación de información, y posterior validación de resultados.
- Análisis de bases de datos de planificación de la División El Teniente y de los datos reales de producción.

2) Formulación de metodología para la creación de modelos de simulación enfocados a la producción de la mina, tanto en el nivel de producción como en el nivel de transporte (correas) de la mina Diabolo Regimiento explotada por Block/Panel Caving.

3) Aplicación de la metodología utilizando el software de eventos discretos DSim:

- Definir variables de entrada, salida, y alcances del modelo de simulación.
- Generar modelo de simulación básico y sin interferencias.
- Incorporar de manera paulatina las interferencias operacionales.
- Generación de escenarios.

4) Análisis de resultados.

3.1. Definición de la zona de estudio

Se define la mina a ser simulada, además de un análisis cualitativo y cuantitativo de los distintos procesos y componentes del sistema minero subterráneo en operación. Se deben establecer los siguientes elementos del modelo.

3.1.1. Límite de Batería

El límite de batería del modelo es desde los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción, hasta el chancador giratorio ubicado en el nivel de transporte intermedio al final del sistema de correas

En la Figura 15 se muestra un esquema general acerca de donde se ubica cada parte del modelo:

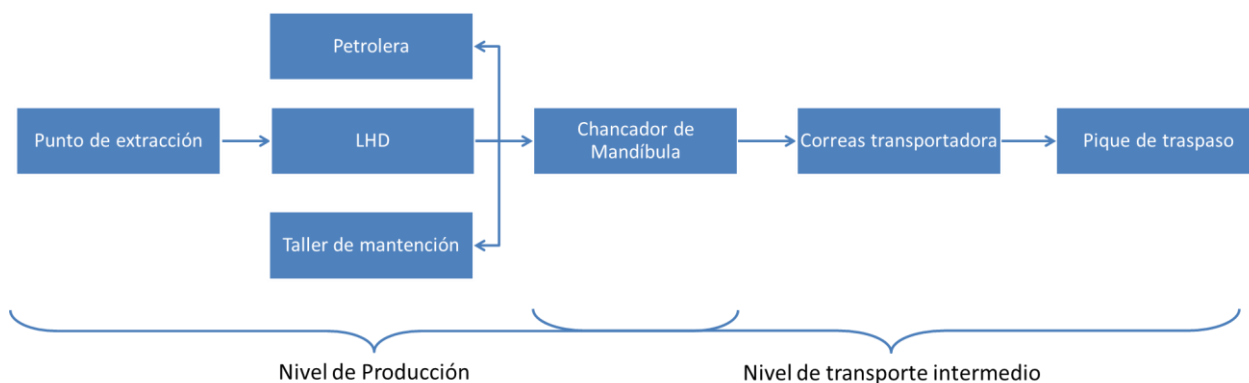


Figura 15: Límite de batería modelo de simulación

Por otro lado, es importante definir los inputs que se utilizarán en cada una de las etapas de la metodología, los cuales se detallan a continuación:

- Los inputs de altura de columna del modelo son los obtenidos a partir del P-0 2015, para la calibración y validación del modelo, donde se detallan las alturas de columna inicial y final de cada mes.

- Para calibrar y validar el modelo se considera la producción de 3 meses del 2015, marzo, junio y septiembre.
- Una vez validado el modelo se evaluará el P-1 2017, que también posee las alturas iniciales y finales de cada mes.
- Para evaluar el plan P-1 2017 se simularán cada uno de los meses del año por separado.

3.1.2. Objetivos

Estos deben estar vinculados a lo que se logra obtener del estudio de la simulación. Por lo general, los modelos que simulan carguío y transporte de mineral tienen como objetivo determinar capacidades máximas dadas las interferencias operacionales del sistema, también puede ser validar el mismo modelo de simulación.

3.1.3. Alcances

Los alcances determinan las consideraciones que se harán del modelo, es decir su nivel de detalle, estos se relacionen con los supuestos considerado, limitaciones y restricciones consideradas dentro de éste.

3.1.4. Límite de batería

Se indica dónde comienza el modelo de simulación y donde termina. Una vez que se determina esto es posible condicionar o acotar los parámetros de entrada del modelo y sus variables de salida.

3.2. Levantamiento de información

La recolección de datos es un paso fundamental para la poder calibrar y validar un modelo. Esta se puede obtener de varias fuentes, tales como opiniones de expertos en el área, base de datos o toma de datos empíricos.

Es de particular interés realizar una recopilación de información estadística de las variables que se ingresarán al modelo, así como también el rango de valores en los que tienen que estar las variables de salida.

En el manejo de materiales existen dos tipos de información relevantes.

- La primera es la información que está documentada dentro de la mina, como pueden ser los planes de producción, la cantidad de mineral que se le debe extraer a cada punto y en qué periodo. También pueden ser los resultados de producción reales obtenidos, los cuales deben ser contrastados con los resultados obtenidos por la simulación. Toda esta información debe ser recolectada por medio de bases de datos.
- También existen otro tipo de información que se refiere a los criterios de operación que ocupan los operadores para trabajar, un ejemplo claro de esto son la elección de los puntos de extracción a los que el LHD debe ir, o en el caso de que un Chancador esté en mantención, donde enviar los LHD's que estaban destinados para ese sector.

Los datos que se ingresen al modelo pueden ser de dos tipos:

- **Valores Estáticos:** Se utilizan valores determinísticos que se ingresan directamente al modelo de la simulación.
- **Variables Estocásticas:** Se les denomina así a aquellos valores que no tienen un valor fijo, sino que pueden variar dentro de un rango de valores que tienen una cierta distribución de probabilidad. En la mayoría de los casos se pueden utilizar distribuciones de probabilidad típicas para ciertos fenómenos. Por ejemplo, para la probabilidad de ocurrencias de fallas lo típico es utilizar la distribución de probabilidad Weibull

En el caso de que la información recolectada se obtenga a partir del levantamiento de datos en terreno o de bases de datos, a éstas le debe realizar un filtrado de datos y de este modo generar distribuciones de probabilidad mediante un ajuste de datos, luego es recomendable realizar un test de bondad de ajuste para finalmente agregar las distribuciones al modelo. (Contreras, 2016).

Tras la recolección y análisis de los datos es que se cumplen las condiciones necesarias para tener una versión inicial del modelo de simulación.

3.3. Conceptualización del modelo

Antes de realizar la construcción el modelo de simulación, es necesario entender como interactuarán entre sí los distintos elementos del modelo, lo cual se hace en base a los objetivos del modelo, los alcances y el límite de batería. Este modelo conceptual debe ser revisado por expertos en el tema para validarlo antes de la codificación.

3.3.1. Principales elementos del modelo

Los principales aspectos que debe considerarse en un modelo conceptual para el manejo de materiales de una mina Block/Panel Caving son:

3.3.1.1. Lugares principales

a) Taller de Mantenimiento (Tie Down)

Al taller de mantenimiento irán todos los LHD's que se necesiten ser reparados, ya sea por mantenimientos programadas o por fallas inesperadas, dado que el modelo se realizará en base a un caso de estudio conocido, este ya tiene ubicación fija.

Es importante considerar cuales son las rutas que los equipo toman para ir hacia el taller de mantenimiento, ya que estas varían según la fase donde estén trabajando los equipos.

b) Petrolera

A la petrolera se dirigirán los LHD's a los que les quede poco combustible, Por lo mismo cada equipo debe tener un atributo en el cual vaya contabilizando cuanto combustible le queda al equipo según la capacidad de su tanque.

Dadas las dimensiones del escenario a simular es que se debe definir si es que en terreno existen estaciones de petróleo que sean móviles para así considerar que los equipos que se encuentren cerca vayan a esas y no a las establecidas según el layout original.

c) Puntos de Extracción

Los puntos de extracción están ubicados en las zanjas del layout y se tiene acceso a ellos por medio de las calles, es necesario considerar que cada punto de extracción tiene una cantidad de tonelaje determinada a retirarle, dada por los planes mensuales.

Se debe considerar que estos puntos de extracción pueden presentar problemas o interferencias, como los son las colgaduras o existencia de bolones que impidan seguir extrayendo de un mismo punto,

d) Chancadores de Mandíbula

Dada la configuración del caso de estudio es que cada chancador posee 3 puntos de vaciados, los cuales condicionan el lugar de vaciado asociado a cada calle en la que se está trabajándose. Además, se tiene que no pueden descargar 2 o más LHD's al mismo tiempo.

Por otro lado, estos chancadores cuentan con una capacidad máxima que viene dada por la tolva que está sobre éste y una tasa de descarga hacia las correas.

e) Chancador Giratorio

Es el chancador al cual llega el circuito de las correas en el nivel de transporte intermedio.

Tanto para el chancado de mandíbulas como para el giratorio, los problemas más relevantes asociados a esto son las mantenciones y fallas que se les asocia, dado que si uno de ellos no está disponible, afecta directamente a la producción de las calles y por consecuencia al funcionamiento de las correas.

3.3.1.2. Principales equipos y sus características

Lo primero que se debe definir es la flota con la que se cuenta en el nivel de producción. La flota estará compuesta únicamente por equipos LHD, de los cuales se necesita la siguiente información:

- Capacidad de carguío.
- Capacidad nominal del balde.
- Consumo de combustible.
- Velocidades del equipo.
- Mantenciones programadas
- Reparación

Para la capacidad de carguío no es recomendable utilizar una cantidad fija, sino que una distribución uniforme, cuyo promedio sea la capacidad nominal del equipo, esto debido a que en una palada la cantidad de mineral que se cargará es variable, ya que

depende de la granulometría, la humedad del mineral, la forma de cada una de las partículas, el factor de llenado del balde, etc.

La capacidad nominal del balde se asumirá constante para todos los equipos ya que no debería variar con el tiempo.

Respecto al consumo también se puede asumir que es el mismo todo el tiempo.

Por último, la velocidad de los equipos es una variable que impacta directamente en los tiempos de traslados y de ciclo de un LHD', a pesar de que lo más fácil sería considerar una velocidad promedio, para acercarse más a lo que ocurre en la realidad se recomienda considerar dos velocidades, una del equipo cargado y otra de este descargado, estas velocidades serán las mismas, independiente si es que el equipo está andando en reversa o hacia el frente. Por otro lado, idealmente se debería considerar una aceleración y desaceleración, pero para términos del modelo solo se tienen velocidades fijas.

3.3.1.3. Estrategia de extracción

Dentro de la operación existen ciertos criterios que se deben tomar para realizar la extracción de mineral desde los distintos puntos, con el objetivo de cumplir con el requerimiento mensual por punto.

Lo primero que se tiene que considerar es la velocidad de extracción con la que se debe extraer cada uno de los puntos, las cuales son distintas si es que los puntos se encuentran en régimen o en quiebre. Éstas son definidas por el plan de producción con el objetivo de:

- Propagar correctamente el Caving.
- Tener una buena distribución de esfuerzos.
- Mantener una extracción uniforme respecto a puntos cercanos.

Es importante mencionar que estos criterios varían dependiendo de las diversas condiciones operacionales. Pese a esto se debe llegar a un consenso, de cuál es el que se utilizará en la simulación

3.3.1.4. Disponibilidad puntos de extracción

Es importante considerar la probabilidad de que un punto de extracción tenga algún tipo de interferencia, las cuales pueden ser 3:

a) Colgadura

Se produce por la formación de un arco estable de mineral en altura (fino, grueso o mezcla de ambos) al interior del elipsoide, genera pérdida de continuidad operacional en un punto de extracción. El impacto de la colgadura radica principalmente en los efectos que genera en la seguridad y producción respectivamente; para el primer caso implica la utilización de barreras (colpas de gran tamaño o pretilos) que resguarden la integridad de las personas y equipos; y en el segundo caso, bajas tasas de extracción, baja

disponibilidad de área abierta, alta utilización de reducción secundaria (cuadrilla, explosivos, aislación de calle).

b) Sobre tamaño

La presencia de grandes colpas en los puntos de extracción, denominada “colpa al piso” o “colpa a la visera” dependiendo de la ubicación espacial del bloque de roca, también genera interrupción operacional. Esto producto principalmente de la imposibilidad de traslado de la colpa por parte del equipo LHD con el consecuente impedimento de seguir extrayendo mineral del punto de extracción, o por la imposibilidad del martillo de realizar reducción secundaria en la parrilla del pique de traspaso. Esto último queda condicionado por la geometría de las parrillas, que no son iguales en toda la mina (Salazar & Ramirez, 2016).

c) Aguas Barros

Se debe a la aparición de un flujo violento de este material a través del punto de extracción. Este evento se produce por la infiltración de aguas desde la superficie o napas subterráneas, a través del material fragmentado propio de una extracción por block/panel caving, que llega hasta los puntos de extracción. Su magnitud es variable, así como también su impacto en la productividad el sistema. Dependiendo de la faena es que se toman distintas medidas frente a este fenómeno, por ejemplo, para flujos menores de barro a través de los puntos de extracción no implican necesariamente su paralización, ya que, si bien resulta una práctica riesgosa, puede accederse al punto en el equipo LHD y retirar mineral utilizando extracción controlada. En otras ocasiones el flujo es de tal magnitud, que se hace imperativo cerrar cruzados de producción completos por razones de seguridad (Manzur, 2015).

Todas estas interferencias que pueden ocurrir en los puntos de extracción se pueden modelar con una distribución de probabilidad de interferencia del punto o bien que cada cierto tonelaje que se extrae de un punto, se produzca una interferencia, de todos modos, esto va a depender de la historia de la mina en estudio.

Dado esto, es que se tiene que se debe tener un criterio para eliminar la interferencia o no disponibilidad de estos puntos, por lo general en operación a un punto que está colgado o presente sobre tamaño se les realiza la tronadura secundaria, también conocida como “cachorro”. Consultando los criterios en terreno se definirá cuando es momento de descolgar los puntos de extracción.

3.3.2. Layout

El layout donde se produce la simulación es determinante, ya que establece la ubicación de los distintos elementos del modelo, además de ser un factor clave respecto a los tiempos de traslados. Dado que la simulación solo incorpora manejo de materiales el layout siempre será el mismo.

Se considerará que todos los caminos del nivel de producción están a una misma cota, al igual que el en nivel de transporte intermedio donde están las correas.

3.3.3. Parámetros de entrada

Corresponden a números, valores o distribuciones de probabilidad relevantes que se ingresan al modelo.

De manera de hacer el modelo flexible es que los parámetros se definen fuera de este, cosa de solo reemplazarlos con facilidad a la hora de generar distintos escenarios.

Para el manejo de materiales es importante definir:

- Capacidad de la correa
- Velocidad de la correa [km/hr]
- Productividad máxima del chancador [tph]
- Capacidad de los LHD's [ton]
- Factor de llenado de los LHD's [%]
- Tonelaje a extraer por punto en un día, durante un año [ton/(m²*día)]
- Velocidades de viaje de los equipos, tanto vacíos como cargados [km/hr]
- Tiempos de duración de mantenciones [hr]
- Tiempo de duración de fallas [hr]
- Tiempo de cambios de turno [hr]
- Tiempo de colación [hr]

3.3.4. Variables de salida

Para medir el desempeño general de todo el sistema simulado es que se utilizan las variables de salida. También sirven para medir el rendimiento de equipos y/o entregar indicadores para validar.

Debido a la gran cantidad de datos que se recopilan durante la simulación, se hace necesario que las variables de salida puedan ser exportadas a planillas de cálculo, y así poder hacer un análisis de información.

Por lo general se sigue que las variables de salida para un modelo que simula el manejo de materiales dentro de una mina sean:

- Rendimiento de los equipos [tpd]
- Productividad de chancadores [tpd]
- Productividad por punto de extracción [tpd]
- Tiempo efectivo de palas [%]
- Tiempo efectivo de correas [%]
- Tiempo efectivo de chancadores [%]
- Índices operacionales de correas y LHD (Disponibilidad física, utilización, etc.)

3.3.5. Criterios de operación

Los criterios de operación son aquellos con los que se toman decisiones dentro del sistema, estos pueden dividirse en dos:

- **Criterios de decisión:** aquellos que se utilizan para afectar los planes de la mina, es decir estrategias humanas.
- **Criterios de movimiento:** Son aquellos criterios que obedecen a las reglas internas dentro de la mina, por ejemplo, el sentido de una calle a una determinada hora, o la utilización de semáforos para efectuar las descargas en un punto.

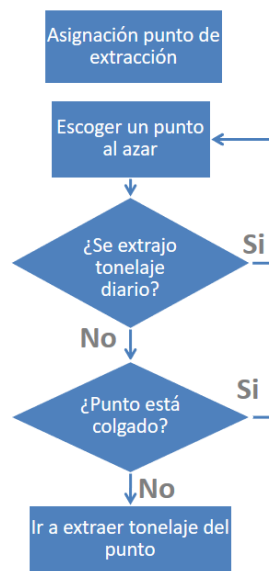


Figura 16: Ejemplo de criterios de decisión

Para el manejo de materiales los criterios de decisión son una de las variables más relevantes ya que determinan las actividades que deben hacerse de acuerdo al plan de producción y considerando los eventos propios de la operación.

En la Figura 16 se observa un ejemplo de criterios de decisión, en particular aquel que posee el equipo LHD cuando debe escoger el punto de extracción al cual dirigirse, para lo que se debe que verificar el tonelaje que se la ha extraído de acuerdo al plan y que el punto no se encuentre colgado.

3.3.6. Modelos Paralelos

Los modelos paralelos corresponden aquellos que son el complemento del modelo base, es decir que se utilizan para cambiar estados o para tomar decisiones que afectan al modelo base.

A continuación, se mencionan los principales modelos paralelos que forman parte de una simulación de manejo de materiales.

3.3.6.1. *Mantenciones programadas de equipos*

Corresponden a la detención planificada de un equipo, lo cual se realiza en base a diferentes criterios, como lo pueden ser por horómetro para el caso de los equipos LHD,

o Tonelaje pasante para el caso de los chancadores o correas. Existen diferentes tipos de mantenencias para los diferentes equipos, las cuales deben ser especificadas en el plan de producción de la mina.

3.3.6.2. Falla de equipos

Es un factor determinante en el rendimiento de todos los equipos, sino el más importante, ya que este es el tiempo que más cuesta incorporar en los planes de producción debido a la incertidumbre del origen de las fallas.

Por lo general la información con la que se cuenta en las faenas son dos:

- **Tiempo Medio Entre Fallas (Mean Time Between Failures, MTBF):** se utiliza para replicar la frecuencia con la que ocurren las fallas de los equipos.
- **Tiempo Medio Para Reparar (Mean Time To Repair, MTTR):** Se utiliza para replicar la duración de las reparaciones para las fallas.

A partir de los datos históricos de la mina de estos tiempos es posible ajustar curvas de distribución de probabilidad. Para utilizar una distribución, tanto para la frecuencia de falla como para los tiempos de reparación, es necesario hacer un análisis de datos previo de las fallas de los equipos correspondientes (Contreras, 2016).

3.3.6.3. Sistema de Turnos y colaciones

Se deben definir las horas en las que se realizaran diferentes actividades, en las cuales los equipos dejan de funcionar, como, por ejemplo: Cambios de turnos, cambio de ropa, colaciones, almuerzo. A partir de esto se definen las horas que en las cuales los equipos están sino efectivamente utilizados para producir.

3.3.6.4. Carga de combustible

El tiempo en el que los equipos se dirigen a cargar combustible depende exclusivamente de cuantas horas han estado funcionando y su consumo de combustible, esto debe considerarse debido a que es un tiempo en el que los equipos no están efectivamente produciendo, pero que es necesario para el funcionamiento de estos.

3.3.6.5. Otras consideraciones

Debe incluirse en el modelo los tiempos de no operación debido a distintos factores tales como:

- Falta de operarios
- Accidentes
- Simulacros de incendio
- Movilizaciones
- Problemas de clima

3.4. Desarrollo del modelo de simulación en DSIM

En esta etapa es donde se integran los datos obtenidos de la recopilación de información, los supuestos y criterios del modelo conceptual, así como también todos los datos que se requieran para obtener un modelo que se asemeje lo más posible a la realidad.

La creación del modelo de simulación del sistema de manejo de materiales se basa en el simulador DSim, cuyo módulo para minería subterránea se encuentra en plena etapa de desarrollo y surge en el Laboratorio de planificación minera Delphos del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile. El simulador es desarrollado en el lenguaje de programación Python y utiliza los módulos de visualización VPython y el módulo de simulación de eventos discretos SimPy.

El primer paso para la utilización del simulador es identificar los distintos tipos de incertidumbres operacionales y caracterización de parámetros operacionales del sistema minero que se simulará, para así seleccionar la distribución que mejor representa a cada incertidumbre.

En base al plan minero que se obtiene, se procede a ingresar al simulador los diferentes componentes del sistema, como los son:

- Frentes de carga (puntos de extracción)
- Frentes de descarga (chancadores, piques)
- Equipos de carguío (LHD's)
- Caminos (layout)
- Correas
- Enlaces

Una vez realizada la descripción de cada una de estos componentes, se procede a evaluar el sistema en ausencia de operación de los distintos componentes mineros, lo que se traduce en ingresar aquellos tiempos en que los equipos mineros no están produciendo efectivamente, unos ejemplos de esto pueden ser los siguientes:

- Cambios de turno
- Colaciones
- Mantenciones
- Fallas
- Reducción secundaria
- Cargas de combustible

Luego de la descripción de los componentes mineros señalados anteriormente, se debe evaluar un modelo de ausencia de operación de los componentes mineros, que consiste en la manera en que se generan los intervalos de tiempo en que el componente minero está en ausencia de producción (Manriquez, 2015). En este modelo de simulación, las actividades que involucran ausencia de operación son todas aquellas que inhabilitan al componente minero a realizar operaciones de producción efectiva.

Al simulador se le puede ingresar un valor fijo de tiempo de ausencia de operación o una distribución de acuerdo a datos históricos. También se debe ingresar el plan de producción que se quiere estudiar, asignando calles de trabajo a cada uno de los equipos LHD en un cierto periodo de tiempo (Turno, diario, semanal o mensual), para lo cual se debe definir el punto de descarga que tiene cada uno de los puntos de extracción, los criterios de colgadura de cada uno de los puntos, la cantidad de mineral que se debería extraer por cada periodo y tiempos de operación de los equipos.

Luego se debe seleccionar la cantidad de realizaciones o réplicas que se generarán con el simulador, con el objetivo de obtener una distribución de probabilidad respecto a la cantidad de mineral asociado al plan de producción y con esto cuantificar las consecuencias que se generan a partir de las incertidumbres operacionales identificadas.

3.5. Verificación y Calibración del modelo

La verificación tiene como finalidad comprobar que el modelo y el programa se comporten como se espera, es decir determinar si el modelo representa de forma precisa la descripción del modelo conceptual y las especificaciones del desarrollador, es la parte de la programación en la que se responde la pregunta: ¿Está funcionando correctamente?, la cual se debe responder en base pruebas estadísticas, que permitirán de manera objetiva dilucidar esta interrogante.

Esta etapa consiste en un proceso iterativo que se realiza paso a paso a medida que se construye el modelo, hasta que se concluye la construcción de este. Se recomienda verificar el modelo por separado a medida que se va construyendo cada una de las partes que lo componen, de esta manera se tiene que la identificación de errores del es más sencilla que realizarla para el modelo completo. Después de este paso, a realizar la etapa de la calibración.

La calibración por su lado, es el proceso en el cual el modelo se ajusta a un periodo de tiempo el cual se quiere representar, de esta forma de manera iterativa se van modificando los parámetros de entrada del modelo y comparando las variables de salida con los datos reales frente a los cuales se calibrará. Un criterio de calibración aceptable corresponde a un error menor a 5%.

3.6. Validación del modelo

En esta etapa se determina si el modelo de simulación es una representación fiable del sistema para los objetivos particulares de estudio, aquí se comparan variables relevantes del sistema real, con las obtenidas por el modelo. Para esto se observa el desempeño de los algoritmos y la coherencia de los resultados en relación a la comparación con resultados históricos que se obtienen de la faena en un tiempo determinado, ya sea al corto, mediano o largo plazo.

El criterio de validación que se propone utilizar para un modelo de manejo de materiales es determinar la producción mensual de la mina en general y el de cada una de las calles.

Para esto se contarán con tres resultados, el entregado la herramienta computacional CPlanner de División el Teniente para realizar los planes anuales, el resultado entregado por el simulador DSIm, y el dato histórico real de cuanto fue la producción de las calles en un periodo de tiempo determinado.

En base a esto, se propone que la validación se realice comparando los resultados de productividad entregados por el Simulador DSIm, con los datos reales, donde se busca que la diferencia entre estos resultados, presente un error relativo menor al 10% respecto al dato real.

3.7. Realización de corridas y análisis de la implementación del modelo

Una vez validado el modelo, se procede a simular el sistema minero para un periodo futuro, con el objetivo de verificar escenarios, analizar las vulnerabilidades y oportunidades encontradas, para finalmente interpretar los resultados. Dependiendo del éxito que obtuvo el modelo es que puede llegar a generalizarse para distintos casos de estudios. Si esto ocurre, el modelo queda a disposición del cliente, quien debe seguir todos los pasos de la metodología rigurosamente incrementando así la probabilidad de tener éxito en los nuevos casos de estudio.

CAPÍTULO 4

4. CASO DE ESTUDIO

En esta sección se mostrará la aplicación de la metodología propuesta en la sección anterior al caso de estudio en el que se trabajará, desde la definición de la zona de estudio hasta la validación del modelo.

4.1. Definición de la zona de estudio

El caso de estudio comprende la simulación del manejo de materiales de la mina El Diablo Regimiento de la Mina El Teniente.

4.2. Levantamiento de información

La información recopilada como input fue obtenida de varias fuentes las cuales se detallan a continuación.

Para el caso de las fallas y mantenciones de correas, chancadores y LHD's los datos fueron obtenidos de la Superintendencia de Mantenimiento, quienes facilitaron planillas de Excel con los tiempos en los que cada uno de los equipos estuvieron detenidos. A dichas planillas fue necesario aplicarles una gran cantidad de filtros, ya que presentaban datos duplicados y una gran cantidad de outliers. Dada la extensión de éstas, es que no se exponen en el presente informe.

Respecto al tonelaje histórico extraído por cada uno de los puntos el año 2015, el dato fue brindado por la Superintendencia de Gestión y Producción, quienes también facilitaron una plantilla de Excel con las baldadas realizada en cada uno de los puntos y el chancador en el cual descargan.

La información de los LHD's, tales como, factores de cargas, tiempos de carga y descarga fueron velocidades, fueron obtenidas a partir del criterio experto de Ingenieros que trabajan también en la Superintendencia de Gestión y Producción.

4.3. Conceptualización del modelo

Para entender como interactuarán entre sí los distintos elementos del modelo se deben identificar detalladamente cada uno de éstos, además del layout que se utilizará, los parámetros de entrada y variables de salida. Esto se revisa en la siguiente sección.

4.3.1. Principales elementos del modelo

Los elementos del sistema están divididos en los lugares que existirán en el modelo como también sus componentes, es decir los equipos que se utilizaran y sus características.

4.3.1.1. Lugares principales

- **Puntos de extracción:** los puntos de extracción corresponden al lugar de donde el mineral a extraer cae producto del caving y los LHD's (palas) lo retiran para llevarlo a un punto de vaciado, en este caso, al chancador de mandíbula. Los puntos de extracción son puntos fijos que presentan distintas tasas de extracción, lo cual se puede traducir en una cantidad de baldadas diarias que se les puede retirar.
- **Puntos de vaciado Nivel de Producción:** Para este caso de estudio corresponden chancadores de mandíbula, los cuales tienen 3 accesos donde los LHD's pueden descargar. Es importante mencionar que solo puede vaciar un LHD al chancador, es decir no pueden vaciar dos al mismo tiempo.
- **Petrolera:** Es el lugar donde se dirigen los equipos en el caso de que les quede poco combustible, en este caso de estudio se contara con una petrolera fija, la cual está considerada en el layout
- **Taller de mantención (TD):** Es el lugar al que se dirigen los equipos para realizar las mantenciones programadas y reparación de fallas, además es la estación de espera para la cuadrilla de reducción secundaria.
- **Puntos de vaciado Nivel de Transporte Intermedio:** para este caso de estudio corresponde a un chancador giratorio, es el lugar en el cual las correas transportadoras descargan el material en el nivel de transporte intermedio.

4.3.1.2. Principales Equipos y sus características

1) Nivel de Producción

En este nivel se considerará solo los equipos de producción, que corresponden a equipos LHD con las siguientes características:

Tabla 9: Parámetros equipos LHD

| LHD | Valor medio (μ) | Error (σ) | Distribución | Unidad |
|--------------------------|-----------------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Flota | 10 | - | - | unidades |
| Capacidad | 13 | 2 | Uniforme | yd ³ |
| Tiempo descarga | 20 | 10 | Uniforme | s |
| Tiempo carga | 15 | 10 | Uniforme | s |
| Tiempo descarga | 20 | 10 | Uniforme | s |
| Velocidad cargado | 10 | - | - | km/hr |
| Velocidad vacío | 13.5 | - | - | km/hr |
| Turnos | 3 | - | - | Turnos/día |

En los puntos de vaciando se encuentran los chancadores de mandíbula, los cuales presentan las siguientes características:

Tabla 10: Parámetros chancador de Mandíbula

| Equipo | Capacidad Tolva [ton] | Vaciado de mineral [ton/hr] |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|
| Chancador F1 | 400 | 846 |
| Chancador F4 | 400 | 1,000 |
| Chancador F2 | 400 | 1,000 |
| Chancador F3 | 400 | 846 |

La información presente en las dos tablas se obtuvo a partir del personal de la que trabaja en la mina y su criterio experto, tanto de la Superintendencia de Mantenimiento como de la Superintendencia Gestión Producción.

2) Nivel de Transporte Intermedio

En este nivel también se considerarán solo los equipos de producción, es decir las correas transportadoras que presentan las siguientes características:

Tabla 11: Parámetros correa transportadora

| Correa | x0 | y0 | z0 | x1 | y1 | z1 | Velocidad [m/s] | Próxima Correa | Ton Mantención |
|-------------|-----|------|----|-----|------|----|-----------------|----------------|----------------|
| correaBF02 | 470 | -860 | 0 | 500 | -860 | 0 | 1 | correaCV21 | 5000 |
| correaCV21 | 500 | -860 | 0 | 500 | -588 | 0 | 2.5 | correaCV212 | 50000 |
| correaCV41 | 320 | -588 | 0 | 500 | -588 | 0 | 1.5 | correaCV212 | 50000 |
| correaCV212 | 500 | 588 | 0 | 500 | -347 | 0 | 2.5 | correaCV11 | 50000 |
| correaCV11 | 500 | -347 | 0 | 528 | -290 | 0 | 2.4 | correaCV112 | 50000 |
| correaBF01 | 500 | -290 | 0 | 528 | -290 | 0 | 0.25 | correaCV112 | 5000 |
| correaCV112 | 528 | -290 | 0 | 610 | -122 | 0 | 2.4 | correaCV113 | 50000 |
| correaCV113 | 610 | -122 | 0 | 642 | -53 | 0 | 2.4 | correaCV01 | 5000 |
| correaCV01 | 642 | -53 | 0 | 678 | -3 | 0 | 2.4 | | 50000 |
| correaCV31 | 771 | -270 | 0 | 694 | -198 | 0 | 1 | correaCV32 | 5000 |
| correaCV32 | 694 | -198 | 0 | 610 | -122 | 0 | 1.5 | correaCV113 | 5000 |
| correaBF04 | 296 | -567 | 0 | 320 | 0 | 0 | 1 | correaCV41 | 5000 |

Es importante mencionar que aquellas correas que poseen tres números en sus dígitos representan la extensión de la correa principal, es decir la correa CV212, es la extensión de la correa CV21 que además recibe mineral de la correa CV41. Lo mismo ocurre con las correas CV112 y CV113

4.3.1.3. Disponibilidad puntos de extracción

La disponibilidad de puntos vendrá dada por dos factores:

- 1) La cantidad de tonelaje pasante: Dependiendo si el punto está en quiebre o liberado, el tonelaje pasante que este se cuelgue puede variar. Mientras menos tonelaje se ha extraído del punto, es decir la altura es menor, menor debería ser

el tonelaje que se tenga que extraer para que el punto esté colgado, por el contrario, si ya se ha extraído cierta cantidad de tonelaje del punto (quedando en régimen), la tendencia es que las colgadas se produzcan a una mayor tasa de tonelaje pasante. De todos modos, como se está reproduciendo un caso de estudio es necesario tener la información propia de la mina, la cual indica que la productividad (tonelaje pasante entre colgadura observada) se comporta según lo indica el Gráfico 1 (Salazar & Ramirez, 2016).

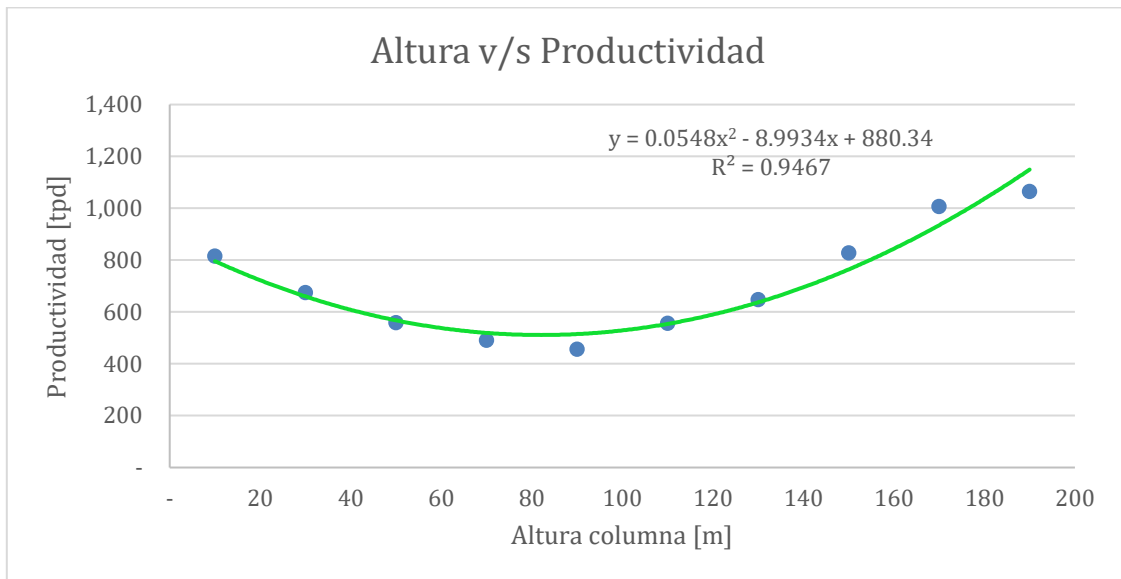


Gráfico 1: Altura v/s Productividad en Diablo regimiento

- 2) Altura alcanzada en la planificación: Dado a que uno de los inputs es la altura final a la cual cada uno de los puntos debe llegar en un mes es que una vez que se alcanza ésta, el punto queda automáticamente como “No disponible” con el objetivo de que se cumplan las restricciones de geometría que incluye la planificación mediante la herramienta computacional CPlanner.

4.3.2. Layout

El modelo de simulación contempla las 4 primeras fases del Diablo Regimiento, de las cuales cada una tiene un chancador asociado. Se cuenta con un total de 20 calles y 37 zanjas, lo cual da un total de 334 puntos de extracción ingresados al modelo, de los cuales existen 216 habilitados para el mes de marzo, 224 para junio y 230 para el mes de agosto, esto se debe principalmente a que existen puntos que en ciertos periodos no están abiertos, u otros que presentan sobre extracción por lo cual no se deben seguir extrayendo

También se cuenta con un taller de mantención ubicado en el barrio cívico y una Petrolera. Es importante mencionar que se asumirá una estación de carga de combustible, tal y como se muestra en la Figura 17.

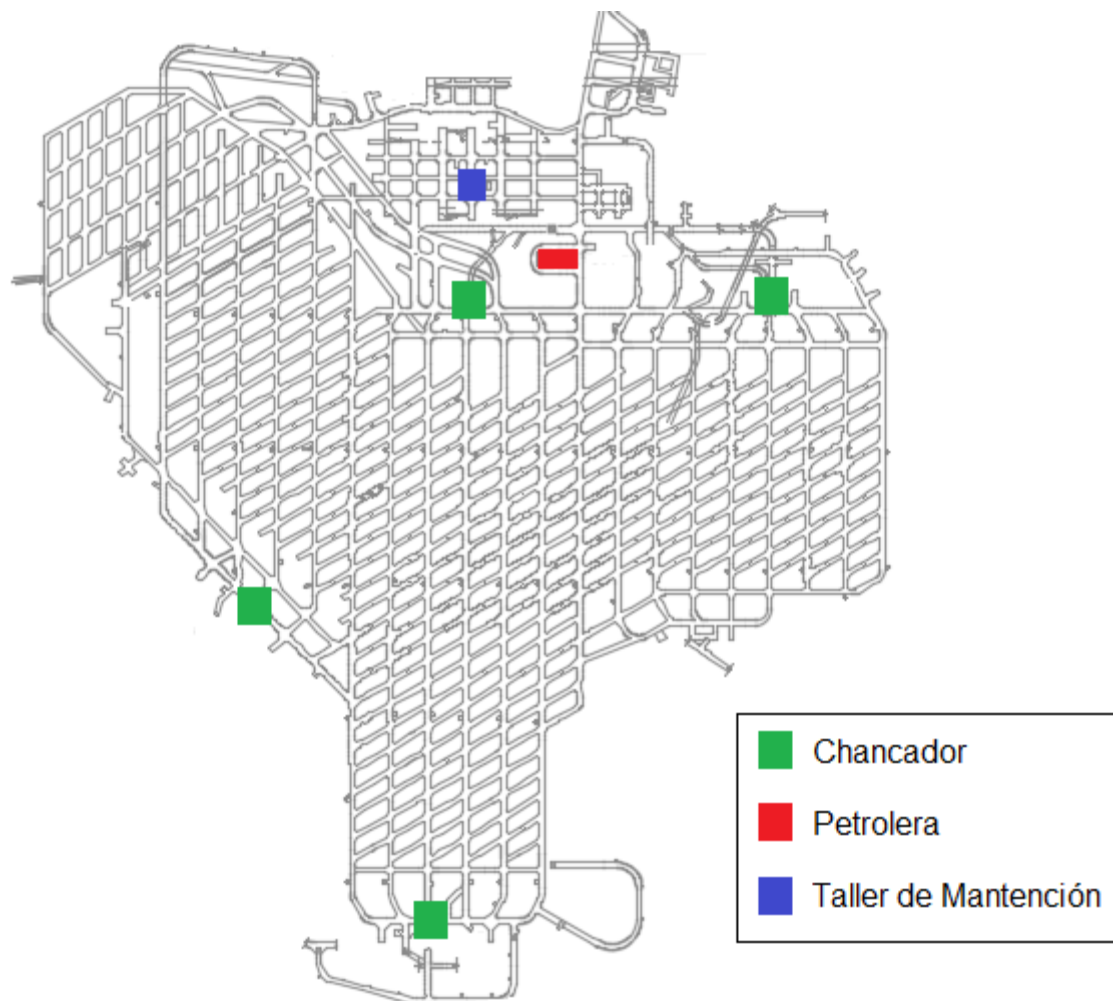


Figura 17: Layout nivel de producción Diablos Regimiento

Para el caso del nivel de transporte intermedio se cuenta con un total de 9 correas de las cuales 4 son “de sacrificio” y están ubicadas inmediatamente después del chancador. El motivo por el cual se utilizan estas correas es que el material proveniente del chancador por lo general presenta muchos residuos metálicos que dañan las correas, por lo que se prefiere tener una correa relativamente corta y que sea fácil de reparar cerca del chancado. En la Figura 18 se visualiza el nivel de transporte intermedio con sus respectivas correas.

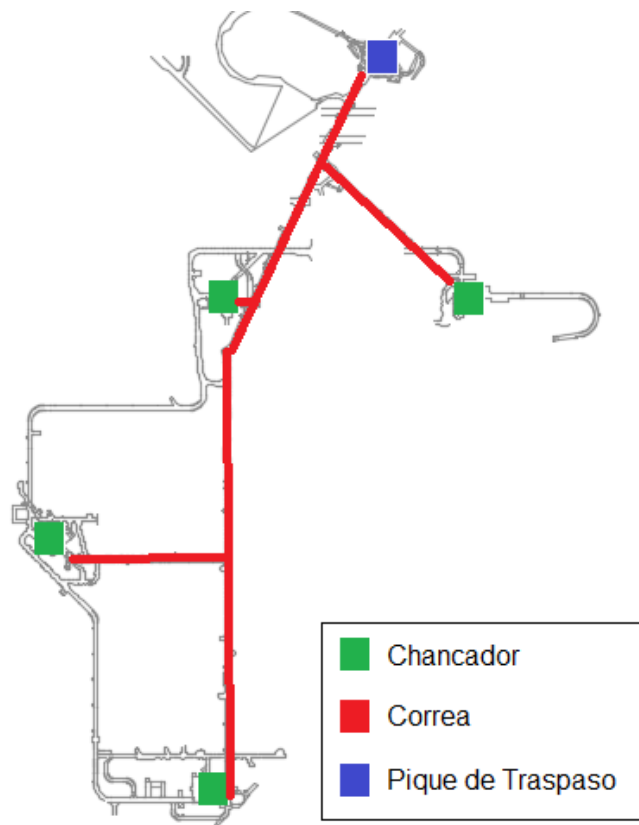


Figura 18: Layout nivel de transporte intermedio Diablos Regimiento

4.3.3. Parámetros de entrada

Aparte de las características de los equipos mencionados anteriormente se definen los siguientes parámetros de entrada al modelo para los puntos de extracción.

4.3.3.1. Puntos de Extracción

Dado la gran cantidad de puntos de extracción se hace útil implementar una planilla Excel en la cual se ingresa la principal información requerida del modelo, tal y como se presenta en la Tabla 12

Tabla 12: Ejemplo de planilla para ingresar inputs de los puntos de extracción

| Nombre Punto | H Inicial | H Final Mes | H Insitu | HCE | Perfil _VEL | Fase | punto vaciado | 2da Fase | 2do Punto vaciado |
|--------------|-----------|-------------|----------|-----|-------------|------|---------------|----------|-------------------|
| pextC7Z13H | 0.0 | 0.0 | 160 | 147 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| pextC7Z14H | 0.0 | 0.0 | 160 | 160 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| pextC7Z15H | 0.0 | 0.0 | 160 | 168 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| pextC7Z16H | 0.0 | 3.6 | 160 | 179 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |

En base a esta información los LHD tendrán un punto de descarga principal para cada uno de los puntos y en el caso de que el punto de vaciado no se encuentre disponible (por lo general por mantención o falla del chancador) existe otro secundario.

Se destaca el ingreso de las alturas de inicio y final del periodo en estudio, lo que garantiza que se cumplan las restricciones geomecánicas y de uniformidad en la extracción necesarias para mantener la estabilidad y robustez del plan.

Para calcular la velocidad de extracción de cada punto se utilizan los siguientes criterios que son los utilizados en el plan de producción Rev-0 2015:

Tabla 13: Criterio Disponibilidad de Área por altura de columna en Diablo Regimiento

| Disponibilidad de Área por Altura de Columna | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|----|----------|------------|----|----------|----------|----|----------|----------|
| ID Método | Inicio de Quiebre | | | En Quiebre | | | Liberado | | | Limitada |
| | %Hp | m | Disp (%) | %Hp | m | Disp (%) | %Hp | m | Disp (%) | Disp (%) |
| 0 (Normal) | 5 | 80 | 75 | 30 | 80 | 80 | 130 | 80 | 80 | 50 |
| 1 (Limitado) | 5 | 80 | 20 | 30 | 80 | 20 | 130 | 80 | 20 | 20 |
| 2 (Barro) | 5 | 80 | 0 | 30 | 80 | 0 | 130 | 80 | 20 | 0 |

A partir de estos criterios que definen los estados de los puntos, es decir, si está en; inicio de quiebre, en quiebre, liberado o limitado. Por otro lado se indica el perfil de velocidad que el punto tendrá otorgándole un ID del Método. Para el caso estudiado se cuenta con 3 métodos que poseen el mismo perfil de velocidad.

Tabla 14: Criterio de Perfil de velocidades en Diablo Regimiento

| Perfil de Velocidades (tpd/m ²) | | | | |
|---|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| ID Método | Vel. Inicio quiebre | Vel. Final quiebre | Vel. Máxima liberado | Vel. Máxima limitada |
| 0 | 0.44 | 0.82 | 1 | 1 |
| 1 | 0.44 | 0.82 | 1 | 1 |
| 2 | 0.44 | 0.82 | 1 | 1 |

Con estos criterios, es posible determinar los perfiles de velocidades de cada uno de los puntos de extracción a partir de su altura inicial, altura de la roca primaria y la altura económica de cada uno de estos.

4.3.3.2. Ingreso del Plan de Producción

La forma de ingresar el plan de producción al modelo es asignándole tareas a los LHD, es decir, se le asigna una calle con sus respectivos Puntos de extracción en un periodo de tiempo que para esta ocasión serán por día, es decir un LHD estará todo un día (3 turnos) asignado a una calle., la manera de ingresar la calle es escribir en las celdas que intersecta al cargador con el día la palabra "tareasCxx", donde xx es el número de la calle que se le quiere asignar. En la siguiente Tabla 15 se muestra una plantilla ejemplo en la que se ingresan las tareas a los distintos equipos.

Tabla 15: Ingreso Plan de producción en el modelo

| Calles | cargador7 | cargador11 | cargador15 | cargador19 | cargador21 | cargador23 | cargador25 |
|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Dia1 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC21 | tareasC23 |
| Dia2 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC7 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC17 | tareasC19 |
| Dia3 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC9 | tareasC21 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 |
| Dia4 | tareasC13 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC21 | tareasC23 |
| Dia5 | tareasC15 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC17 | tareasC19 |
| Dia6 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 |
| Dia7 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC7 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC21 | tareasC23 |

El proceso de construcción del modelo se realiza de manera manual, en la que se deben seguir los siguientes criterios que se utilizan en operación:

- 1) Dado que las fases tienen un número determinado de LHD asignado, a los LHD siempre se le debe asignar las calles de la fase correspondiente.
- 2) En base a las productividades de las calles que se indica en el plan, se deben dividir las calles de una fase, en clases, es decir aquellas más productivas, medianamente productivas y pocas productivas, asignándole un número X_i , donde i representa la productividad de cada clase de calle y este número debe ser proporcional para cada uno de las éstas, es decir si una clase de calles produce 3,000 tpd y otra clase 1,000 tpd, lo más lógico es que a la primera se le asigne un número 3 y a la segunda un número 1. Por otro lado, si existieran 2 calles que poseen 1,000 tpd y una con 3,000 tpd a la primera clase se le debería asignar un 2 y a la segunda un 3.
- 3) Una vez que todas las clases poseen un número X , se procede a dividir cada X_i en X_{ij} , donde j es una calle de la clase i .
- 4) De esta manera se realiza la sumatoria

$$\sum_i \sum_j X_{ij} = Z$$

Ecuación 1: Sumatoria para determinar proporción de productividad de calles

- 5) Posteriormente se deben rellenar las casillas de la planilla con las calles (tareasCxx) que están destinados a la fase correspondiente en la proporción $\frac{X_{ij}}{Z}$ para así cumplir con la proporción de asignaciones que le corresponde a cada calle dentro de una fase.
- 6) La asignación debe ser de manera intercalada con el fin de no generar errores sistemáticos.
- 7) En el caso de no lograr que la proporción de tareas se rellene en la planilla de manera exacta, esta debe ajustarse manualmente lo más parecido posible a la proporción.

Para mayor entendimiento en la Figura 19 se observa la simbología de colores ingresados en el plan.

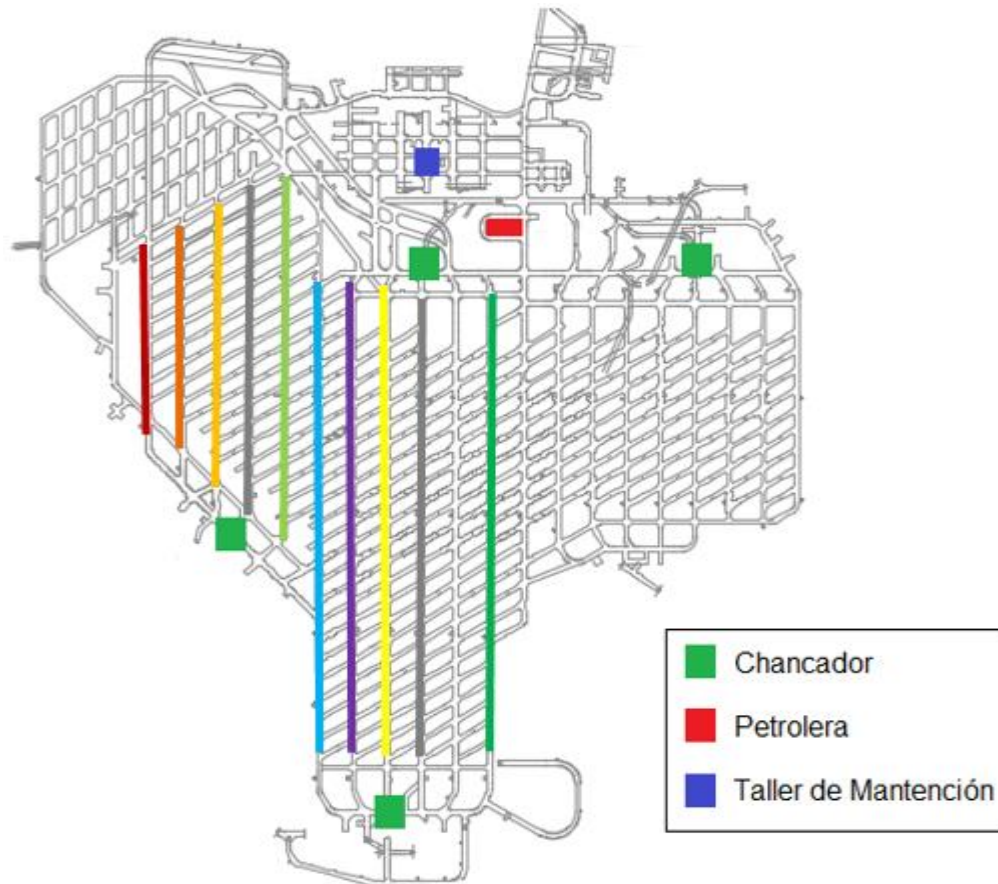


Figura 19: Layout Diablos Regimiento

4.3.4. Variables de salida

Se definieron los siguientes indicadores del desempeño de la producción para realizar la validación del modelo

- 1) Productividad chancadores mandíbula [tpd]
- 2) Productividad correas [tpd]
- 3) Tiempos de LHD:
 - Efectivo:
 - Tiempo en el que el LHD está efectivamente en los ciclos de producción, ya sea viajando al chancador o punto de extracción, cargando o descargando
 - Espera (Interferencia)
 - Tiempos en los que el LHD se topa con otro en un mismo camino y debe esperar a que pase el que lo está ocupando, también considera usando debe esperar para descargar en el chancador porque otro LHD está descargando.
 - Espera de tarea:

- Tiempo en el que el LHD está esperando en chancador por realizar alguna tarea, esto puede suceder porque a la calle que tiene como tarea se le está haciendo reducción secundaria o porque ninguno de los puntos de la calle está disponible, ya sea porque se alcanzó la altura mensual permitida o porque simplemente no se ha abierto el punto
 - Cambio de Turno y colación
 - Tiempo en el cual los LHD no se encuentran operando debido a que se está en cambio de turno o en colación. Este valor a pesar de que varía poco no es fijo ya que el LHD detecta que debe dejar de operar solo cuando termina de vaciar el mineral, por lo que puede pasar casi un ciclo entero de tiempo efectivo (realización de un ciclo de carga) antes de que el LHD se declare en este tiempo.
 - En mantención
 - Considera el tiempo en el que el LHD está en el taller, ya sea porque le ocurrió una falla o por mantención.
 - Combustible
- 4) Tiempos de Chancadores:
 - Tiempo en Falla
 - Tiempo en Mantención
 - Tiempo efectivo
- 5) Tiempos de Correas:
 - Tiempo en Falla
 - Tiempo en Mantención
 - Tiempo efectivo

4.3.5. Sistema de Turnos y Colaciones

El modelo considera 3 turnos por día (8 horas cada uno), en los cuales existe 1 hora de cambio de turno y media hora de colación, distribuidos tal y como se observan en la Figura 20.

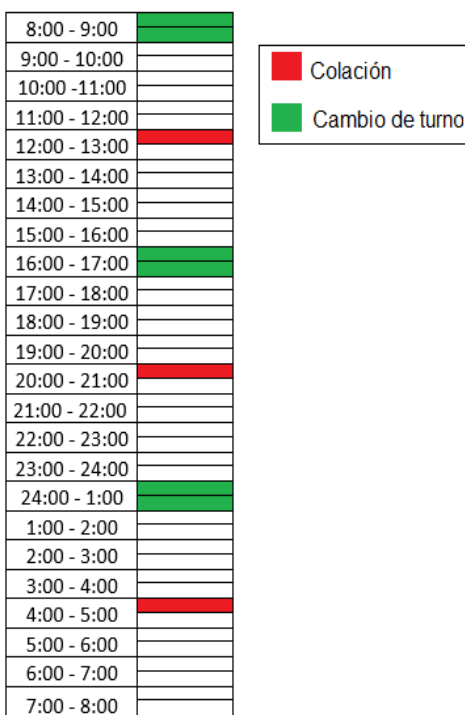


Figura 20: Tiempos de Cambio de turno y colación en un día

4.3.6. Modelos Paralelos

Junto con el caso base, se presentan los modelos paralelos, que son los que ocurren de manera simultánea al caso base y son los que generan las interferencias del sistema, cuya información también se extrajo del criterio experto del personal que trabaja en la Superintendencia de Mantenimiento y en la Superintendencia de Gestión Producción.

4.3.6.1. *Mantenciones programadas de equipos*

Las mantenciones de los LHD se realizan en función de las horas que éstos han operado, en este modelo en particular se realizan cada 50 horas de funcionamiento y la duración de la mantención viene dada por la distribución mostrada en la Tabla 16.

Tabla 16: Parametro distribución uniforme mantención equipo

| MTTR de Mantención (Distribución Uniforme) | |
|--|--------------------|
| Factor Escala[Hr] | Error (σ) |
| 5 | -1, +4 |

Para el caso de los chancadores se tiene que las mantenciones se hacen de manera programada según el tonelaje pasante como se indica en la Tabla 17.

Tabla 17: Tonelaje pasante para mantenimiento de chancadores

| Equipo | Tonelaje Pasante para mantenimiento |
|--------------|-------------------------------------|
| Chancador F1 | 400,000 |
| Chancador F4 | 500,000 |
| Chancador F2 | 470,000 |
| Chancador F3 | 550,000 |

La duración de las mantenciones según la data histórica recopilada se ajusta a una distribución Weibull con los parámetros de la Tabla 18.

Tabla 18: Parámetros distribución Weibull para mantenimiento de chancadores

| MTTR de Mantenimiento (Distribución Weibull) | |
|--|--------------|
| Factor Escala[Hr] | Factor Forma |
| 69.2 | 1.2 |

Como se mencionó anteriormente las mantenciones programadas de los LHD se realiza en el taller de mantenimiento, mientras que las mantenciones de los chancadores y de las correas se realizan en el lugar dónde cada uno de estos equipos está ubicado.

4.3.6.2. *Falla de equipos*

Para determinar las distribuciones de falla de todos los equipos se debió aplicar una serie de pasos que consisten en ordenar, clasificar, filtrar y eliminar datos provenientes de la base entregada por la Superintendencia de Mantenimiento. La metodología utilizada se detalla a continuación:

- 1) Para el caso de las fallas de las correas y Chancadores en base a la información presentes en la columna de “Descripción” y “Denom.ubic.técnica” Se debe clasificar al equipo que pertenece la falla, que puede ser cualquiera de las correas o Chancadores de las fases 1, 2, 3 o 4.
- 2) Crear una columna que indique la duración de la falla para el caso de los equipos LHD, restando el tiempo final con el tiempo de inicio de las fallas. Una vez creada la columna de duración de falla, se tiene la misma información para ambas bases de datos, por lo que los siguientes pasos se aplican a las dos.
- 3) Ordenar toda la tabla con las siguientes prioridades:
 - a. Equipos
 - b. Tipo de Falla
 - c. Fecha Inicio de Falla
- 4) Eliminar los datos duplicados poniendo principal atención en las fechas de inicio y en las duraciones de la falla de los distintos equipos.

- 5) Para cada tipo de falla de cada quipo calcular el tiempo entre fallas lo cual se hace generando una columna en que se tenga la resta de la fecha de inicio de una falla con la fecha de termino de la falla anterior. Es posible que en las intersecciones de distintos equipos con distintos tipos de falla se tengan números negativos, los cuales deben ser eliminados.

Como se explicó en el capítulo anterior para medir la tasa de falla de los equipos se consideraron dos índices: el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo de reparación de fallas (MTTR), los cuales se representan mediante distribuciones de probabilidad que fueron ajustada en base a los datos reales otorgados por la Superintendencia de Mantenimiento de Diablo Regimiento. El detalle de éstas distribuciones y los criterios considerados se encuentran en la sección A del capítulo ANEXOS.

En la mayor parte de los equipos se considera que el tiempo entre fallas viene dada por la distribución de probabilidad de Weibull debido a que esta permite llegar a cualquier otra distribución cambiando solamente el valor de sus parámetros.

4.3.6.2.1. Falla de Correa

Para el caso de las correas se consideraron solo las tasas de falla de los equipos y no las de mantención ya que en base a la información histórica que se tenía, no había suficiente para obtener un criterio de mantención. De este modo en la Tabla 19 se observan los de las distribuciones utilizadas para representar.

Tabla 19: Parámetros de distribuciones usadas para falla de correas

| Correa | Weibull Factor Escala (MTBF) [Días] | Weibull Factor Forma (MTBF) | Weibull Factor Escala (MTTR) [hr] | Weibull Factor Forma (MTTR) |
|-------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| correaCV21 | 6.03 | 0.43 | 0.86 | 0.95 |
| correaCV41 | 3.24 | 0.11 | 1.09 | 1.30 |
| correaCV212 | 6.03 | 0.43 | 0.86 | 0.95 |
| correaCV11 | 22.38 | 1.01 | 1.10 | 0.62 |
| correaBF01 | 14.06 | 1.11 | 2.59 | 0.63 |
| correaCV112 | 22.38 | 1.01 | 1.10 | 0.62 |
| correaCV113 | 22.38 | 1.01 | 1.10 | 0.62 |
| correaCV01 | 12.84 | 1.43 | 5.11 | 0.62 |
| correaCV31 | 49.17 | 1.17 | 1.39 | 0.68 |
| correaCV32 | 49.17 | 1.17 | 1.39 | 0.68 |
| correaBF04 | 58.36 | 1.42 | 1.39 | 1.73 |

Para el caso de la Correa BF02 se decidió aplicar una distribución uniforme para el calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF) dado los datos recibidos por el área de mantención, los detalles se presentan en la sección A de Anexos.

Tabla 20: Parámetros de distribución usada para falla de correa BF02

| Correa | Uniforme Límite Inferior (MTBF) [Días] | Uniforme Límite Superior (MTBF) [Días] | Weibull Factor Escala (MTTR) [hr] | Weibull Factor Forma (MTTR) |
|------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| correaBF02 | 0.00 | 40.00 | 6.03 | 0.35 |

4.3.6.2.2. Falla de Equipos LHD

En el caso de los equipos LHD, se tiene que estos pueden tener distintos tipos de fallas, según los datos recibidos de la Superintendencia de Mantenimiento, los cuales se observan en la Tabla 21 junto con los parámetros de la distribución Weibull utilizados para representar los tiempos entre fallas y los tiempos de reparación de los equipos.

Tabla 21: Parámetros de distribución usada para falla de equipos LHD

| Fallas LHD | Parámetros distribución Weibull | | | |
|--------------------|---------------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | MTBF | | MTTR | |
| Tipo Falla | Factor Escala [Días] | Factor Forma | Factor Escala [Hr] | Factor Forma |
| Falla | 3.1 | 1.1 | 261.6 | 1.3 |
| Neumático | 3.5 | 0.3 | 197.7 | 1.5 |
| Mecánico | 1.3 | 0.5 | 312.6 | 1.1 |
| Estructural | 3.2 | 0.3 | 287.6 | 1.2 |
| Eléctrico | 29.7 | 0.7 | 212.8 | 1.3 |

4.3.6.2.3. Falla de Chancadores

Para el caso de los chancadores el modelo desarrollado considera como un conjunto tanto al chancador como el Plate Feeder, los cuales son uno de los principales focos de falla, dado esto es que los tipos de fallas de este sistema se dividen en las categorías que se muestran en la Tabla 22 junto con los parámetros de las distribuciones utilizadas para representar los tiempos entre fallas y los tiempos de reparación de los equipos.

Tabla 22: MTBF y MTTR de los equipos para el modelo de simulación

| Fallas Chancador | | Parámetros distribución Weibull | | |
|-----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------|
| Tipo Falla | MTBF | | MTTR | |
| | Factor Escala [Días] | Factor Forma | Factor Escala [Hr] | Factor Forma |
| Plate Feeder | 10.8 | 0.3 | 2.8 | 0.7 |
| Hidráulico | 51.7 | 0.9 | 1.6 | 0.8 |
| Cilindro | 33.5 | 0.3 | 4.8 | 0.8 |
| Estructural F1 | 20.38 | 0.73 | 1.31 | 0.53 |
| Estructural F2 | 36.94 | 0.63 | 2.70 | 0.55 |
| Estructural F3 | 36.94 | 0.63 | 2.70 | 0.55 |

La falla estructural de la fase 4, tal y como se muestra en la sección A del capítulo de Anexos, los datos históricos del tiempo medio de fallas, no se ajustan de buena manera a una distribución Weibull, por lo que se le deja una distribución uniforme con los siguientes datos:

Tabla 23: Parámetros de distribución usada para falla de Chancador F4

| Tipo de Falla Chancador | Uniforme Límite Inferior (MTBF) [Días] | Uniforme Límite Superior (MTBF) [Días] | Weibull Factor Escala (MTTR) [hr] | Weibull Factor Forma (MTTR) |
|-------------------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| Estructural F4 | 0.00 | 52 | 3.21 | 0.38 |

4.4. Criterios de operación

A continuación, se muestran los criterios de decisión que cada uno de los equipos posee, generando así, el acarreo de minerales con las interferencias ya descritas.

4.4.1. Criterio de operación LHD

Los equipos LHD son aquellos que ejecutan directamente el plan ingresado al modelo y son uno de los equipos que presentan mayores variaciones e interferencias en su operación, de esta manera los criterios de decisión que éstos ejecutan son una de las partes más importantes del modelo.

En primer lugar, es importante destacar que los equipos LHD toman sus decisiones una vez ya han vaciado el mineral que poseen, es decir, cuando se encuentran en el punto de vaciado del chancador. Este criterio se utilizó debido a que el hecho de tomar una decisión mientras el equipo se está transportando utiliza muchos recursos computacionales, por lo que se opta por simplificar el problema y hacer que una vez que se termina el ciclo principal (carguío y transporte) se puedan tomar diferentes decisiones según las condiciones del propio equipo, modelos paralelos de mantención y falla, o condiciones de disponibilidad de frentes de carga o fallas de equipos aguas abajo.

En la Figura 21 se muestra el esquema de toma de decisión de un equipo LHD:

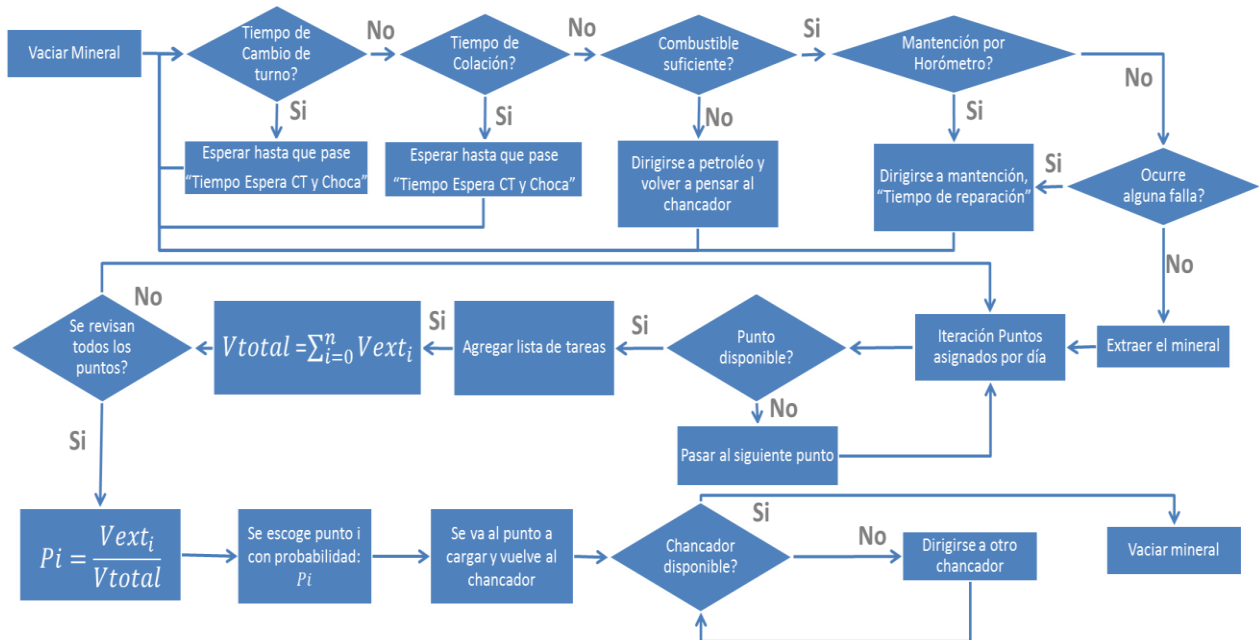


Figura 21: Diagrama de toma de decisiones equipo LHD

En el esquema se puede observar que los primeros dos criterios de decisiones del equipo tienen que ver con los tiempos de cambios de turno y de colación, en donde se verifica si es que el tiempo de la simulación se encuentra en alguno de estos dos estados, y en el caso de estarlo, se espera hasta que pase, luego se revisa el horómetro del equipo por si es que se tiene que cargar combustible en la petrolera.

Después es el turno de las fallas y mantenciones, que en el caso de llegar al tiempo en que estas suceden, el equipo se dirige al taller de mantenimiento y se queda ahí por el tiempo asignado (MTBF).

La estrategia de extracción que se propone en un comienzo para poder cumplir con las velocidades de extracción consiste en crear un ponderador P_i en base a todas las velocidades de extracción de los puntos, que condicionara la probabilidad que el siguiente punto de extracción asignado a un equipo, sea el punto de extracción i .

Finalmente, el equipo LHD debe escoger a que chancador dirigirse, por lo que en primer lugar irá al que tiene asignado cada punto de extracción, y en el caso de que éste se encuentre con alguna falla o en mantención, el equipo LHD se dirigirá al punto de descarga secundario del equipo.

4.4.2. Criterio de operación de Chancador

Para incluir al chancador en el modelo es necesario discretizar el funcionamiento de este, definiendo cada cuanto tiempo se controlará el tonelaje que posee, que será el mismo tiempo en el que el chancador vaciará el mineral a las correas, para eso se toma como input la capacidad de la correa inferior de cada uno de los chancadores en toneladas por hora, y mediante una conversión simple de tiempo se calcula el tonelaje

que debe vaciar el chancador en el tiempo que se discretizará la simulación, que para el caso base será cada 7 segundos.

En la Figura 22 se observan los criterios de decisión que tiene cada chancador, el cual se actualiza.

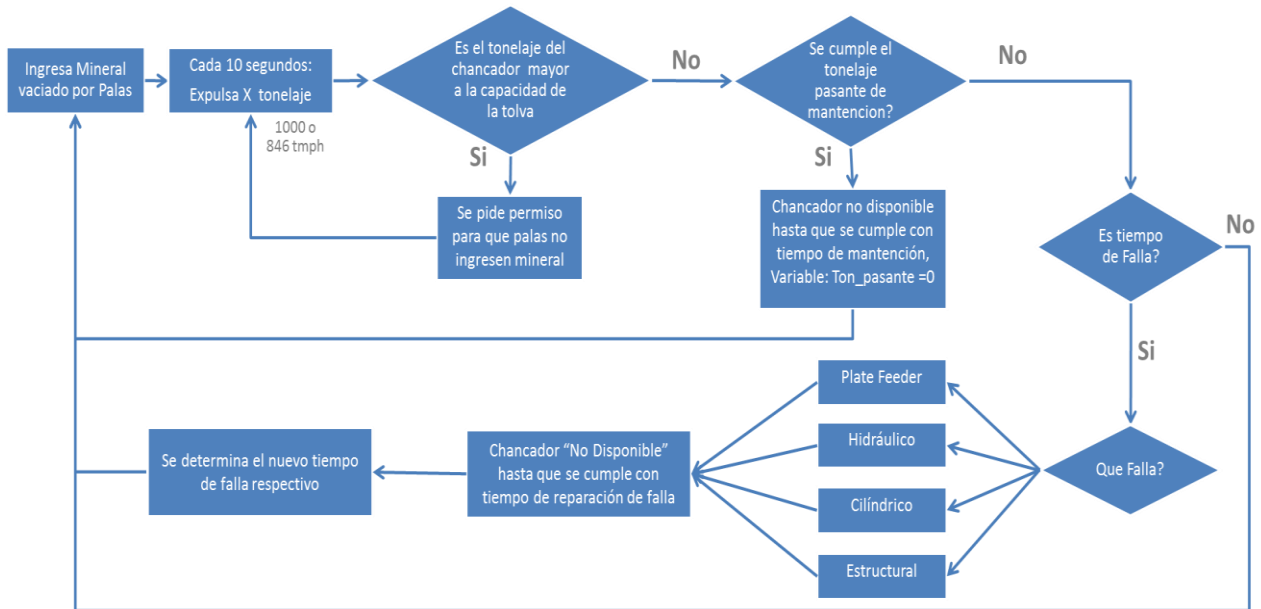


Figura 22: Diagrama de toma de decisiones equipo LHD

Es importante destacar que el modelo considera de todas formas el tonelaje límite que puede tener la tolva de cada uno de los chancadores, y en el caso de estar lleno, no deja que los LHD vacíen a la tolva, sino que esperen a que el chancador sea vaciado y tenga espacio para echar más material

4.4.3. Criterio de operación de cuadrilla de reducción secundaria

Dado a que el modelo incluye una cuadrilla de reducción secundaria se tiene una lógica de movimiento que se presenta en la Figura 23.

De esta parte del modelo se destaca que la cuadrilla de reducción secundaria toma la decisión cuando está ubicado en el taller de mantenimiento y en el caso de no elegir ninguna opción, o que no haya ninguna calle esperando a que se le realice la reducción secundaria es que espera 10 segundos para repetir todo el ciclo.

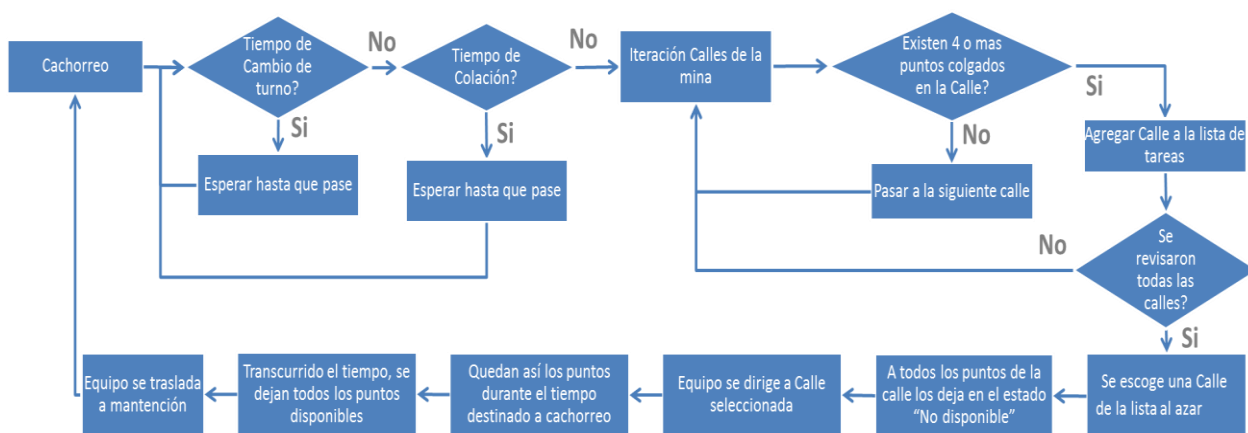


Figura 23: Criterio de decisión de cuadrilla de reducción secundaria

4.5. Información de Entrada

Es importante destacar que como el objetivo principal de este trabajo determinar la variabilidad de los planes del Rev-0 2015, los inputs que se utilizarán para validar el modelo son los mismos que los ingresados en el CPlanner, específicamente los puntos de extracción que serán explotados, la cantidad de equipos que operan en las distintas fases. Por otro lado, los planes entregados por el software CPlanner arrojan la altura que tendrán los distintos puntos al final de cada mes, este dato también se considera como un input para el modelo realizado ya que incluye las restricciones geomecánicas de extracción.

El principal input que se utilizará para calibrar los resultados de la simulación es el Plan de producción (tareas de LHD por periodo), el cual se debe ajustar según el tonelaje requerido por el plan que indica CPlanner en función de los equipos que se utilizaron por fase. En la siguiente tabla se muestran las fases del Diablo Regimiento junto con las características de los LHD que se utilizaron.

Tabla 24: Equipos utilizados en CPlanner

| Fase | Capacidad [ton] | Numero de LHD | Tiempo Fijo [min] | Velocidad Máxima [km/hr] | Tiempo de Operación [hr] |
|--------|-----------------|---------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fase 1 | 13 | 2 | 0.65 | 20 | 12 |
| Fase 2 | 13 | 2 | 0.65 | 20 | 12 |
| Fase 3 | 13 | 3 | 0.65 | 20 | 12 |
| Fase 4 | 13 | 3 | 0.65 | 20 | 12 |

En base a estos datos se ingresaron los parámetros al modelo de simulación mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25: Características de equipos utilizados en simulación

| LHD | Valor medio (μ) | Error (σ) | Distribución | Unidad |
|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------|------------|
| Flota fase 1 y 4 | 5 | - | - | unidades |
| Flota fase 2 | 2 | - | - | unidades |
| Flota fase 3 | 3 | - | - | unidades |
| Capacidad | 13 | 2 | Uniforme | ton |
| Tiempo descarga | 20 | 10 | Uniforme | s |
| Tiempo carga | 15 | 10 | Uniforme | s |
| Tiempo descarga | 20 | 10 | Uniforme | s |
| Velocidad cargado | 10 | - | Uniforme | km/hr |
| Velocidad vacío | 13.5 | - | Uniforme | km/hr |
| Turnos | 3 | - | - | Turnos/día |

Es importante destacar que el plan realizado por la Superintendencia de Planificación Minera Metalúrgica está dividido por fases, es decir no considera las interacciones que existen de manera general en todo el sector, lo que a su vez provoca que la cantidad de equipos que trabajan por fase no puede variar en todo el año.

4.6. Variabilidad de réplicas del modelo

Para poder determinar el número de réplicas que se realizaran en cada una de las simulaciones es necesario hacer un estudio de variabilidad de réplicas, el cual analiza la principal variable de salida que posee el modelo (en este caso la productividad de la mina), y cómo el promedio de este va convergiendo a un solo valor a medida que aumenta el número de réplicas.

De esta manera se determina el número de réplicas en el cual el promedio de la productividad se estabiliza, definiendo la estabilización un resultado con baja diferencia respecto a los resultados anteriores. El criterio de error permitido se indica en la sección de resultados.

4.7. Calibración y Validación del Modelo

El principal índice para realizar la validación del modelo será la producción que se tiene en toda la mina y la producción por calle. En el Gráfico 2 se puede observar la producción planeada en el plan de producción Rev-0 2015 y la producción real del sector. Del plan anual se puede observar que el mes de febrero la producción disminuyó considerablemente, lo cual se deba a que a finales de enero en la División ocurrió un incendio en el chancador secundario haciendo que todas las líneas detuvieran su producción por alrededor de 40 días. Dado esto, es que el mes de febrero queda fuera del periodo de estudio.

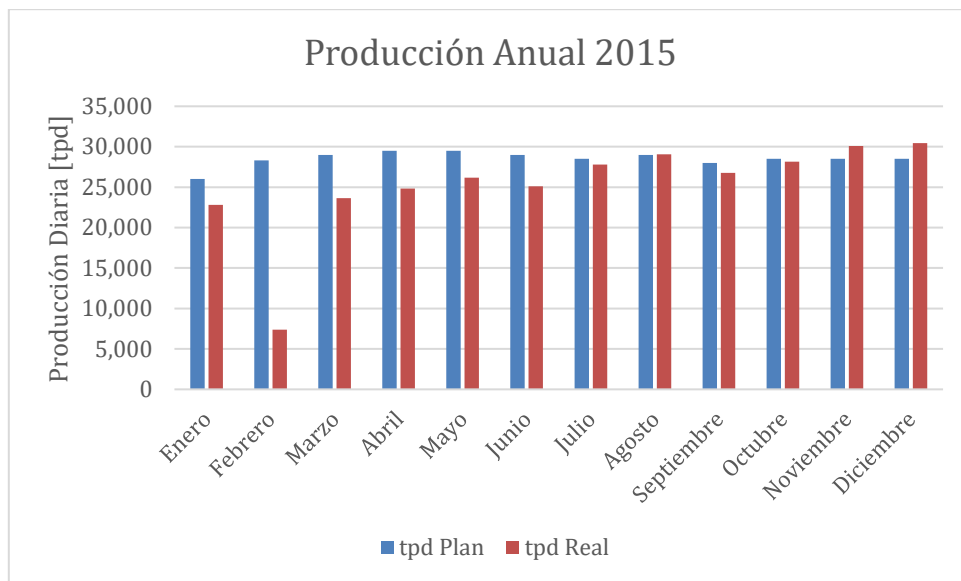


Gráfico 2: Producción planificada y real del año 2015 por mes

4.7.1. Criterios de Calibración

La calibración del modelo se realiza para la productividad del mes de junio, debido a que es un mes que se encuentra en la mitad del año, por lo cual debería influir de igual manera las estrategias operacionales que se han escogido durante el primer semestre para el proceso de extracción, como también el plan que se ha desarrollado para todo el año.

Un factor importante a la hora de realizar el plan en el simulador, es saber en qué calles se concentrará la mayor cantidad de producción y en cuales menos según el plan de producción emitido por la GRMD en el Rev-0 2015, por lo que es necesario identificar la producción diaria de las calles en cada uno de los meses que se simularán, estos datos se presentan en el Gráfico 3.

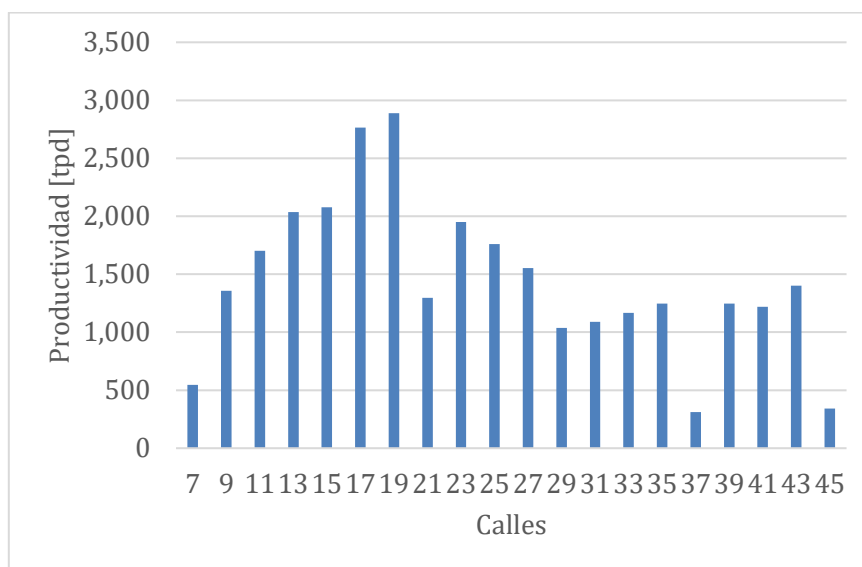


Gráfico 3: Plan de producción por calle P-0 2015 para el mes de junio

A partir de esta distribución de producción de las distintas calles se procede a ingresar al simulador el plan que se utilizará para calibrar el modelo.

Del Gráfico 3 se destaca que las calles 17 y 19 son las más productivas, por lo cual, dentro del Plan del Simulador, hay que preocuparse de que en todos los periodos (todos los turnos) haya un LHD que tenga que extraer de esas calles.

También se observa que en las calles 7, 37, y 45 poseen una producción muy baja, lo por lo que en el plan se le debe dar baja prioridad a estas calles, poniéndolas como tarea a una baja frecuencia.

Del resto de las calles en general presentan una distribución relativamente pareja por lo cual las prioridades son similares entre ellas.

La asignación de calles a cada uno de los equipos en base al plan de producción para el mes en estudio se presenta en Figura 24, donde por términos de simplicidad no se muestra hasta el día 30, ya que el plan es cíclico tal y como se observa.

| | | F3 | | | F1 | | F4 | | | F2 | |
|-------|---|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | cargador9 | cargador11 | cargador15 | cargador17 | cargador21 | cargador23 | cargador25 | cargador31 | cargador35 | cargador39 |
| Dia 1 | A | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC31 | tareasC33 |
| | B | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC35 | tareasC39 |
| | C | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC41 | tareasC43 |
| Dia 2 | A | tareasC13 | tareasC11 | tareasC7 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC45 | tareasC31 |
| | B | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC33 | tareasC35 |
| | C | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC39 | tareasC41 |
| Dia 3 | A | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC43 | tareasC37 |
| | B | tareasC13 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC31 | tareasC33 |
| | C | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC35 | tareasC39 |
| Dia 4 | A | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC41 | tareasC43 |
| | B | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC45 | tareasC31 |
| | C | tareasC13 | tareasC11 | tareasC7 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC33 | tareasC35 |
| Dia 5 | A | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC39 | tareasC41 |
| | B | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC43 | tareasC37 |
| | C | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia 6 | A | tareasC13 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC35 | tareasC39 |
| | B | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC41 | tareasC43 |
| | C | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC45 | tareasC31 |

Figura 24: Asignación de tareas en base al plan de producción de junio

En el plan se observa que para las calles de la Fase 3, se repite la calle 15 más que el resto, esto se hace porque en las primeras simulaciones el tonelaje de la calle daba producciones muy bajas y el de la calle 7 daba muy alto, por lo que se optó por cambiar el turno de la calle 7 por medio, por la calle 15.

4.7.2. Criterios de Validación

Una vez se haya calibrado el modelo se procede a validarlo, es decir ingresar los mismos inputs que este posee, pero para otro periodo de estudio.

Los periodos elegidos para validar el modelo fueron 2 meses: marzo y septiembre, debido a que son representativos del primer y segundo semestre respectivamente. Por otro lado, elegir estos dos meses permite verificar en que época del año se cumple de mejor manera el plan anual. Dado esto se procede a ajustar las características de cada

uno de los puntos de extracción para estos periodos de tiempo, básicamente la altura inicial del punto y altura final según el plan entregado por la herramienta computacional CPlanner.

Como el modelo también incluye la opción de que un LHD pueda descargar en un chancador alternativo o secundario, es que también se validará el modelo con el tonelaje que ha pasado por cada uno de los chancadores. En la sección B del capítulo de anexos se presentan las producciones reales y planificadas por fase de los periodos mencionados anteriormente, las cuales servirán para validar el modelo propuesto.

A pesar de que el modelo podría calibrarse de manera muy rigurosa hasta que el tonelaje de la mina se parezca al real. Es necesario verificar que si lo que ocurre en la simulación es coherente con lo que pasa en la realidad, para lo cual se utilizarán los tiempos de los equipos (LHD, chancadores y correas). En especial para validar el tiempo de los LHD se tiene que la planificación realizada en el Rev-0 2015.

4.7.2.1. Validación del modelo en mes Marzo

Al igual que para la etapa de calibración para validar el modelo para el mes de marzo se debe revisar el plan que posee el mes y como la producción se reparte a en todas las calles, lo cual se presente en Gráfico 4.

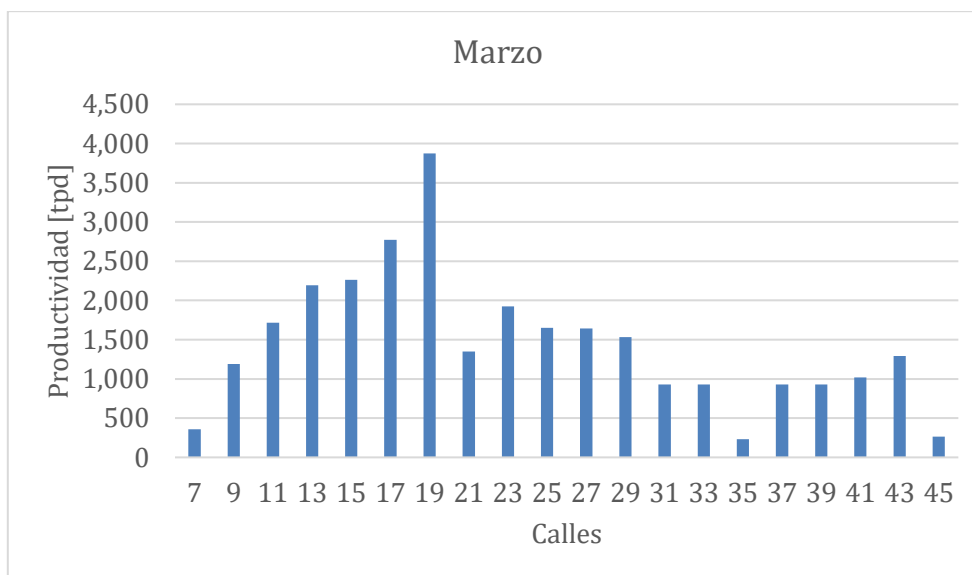


Gráfico 4: Plan de producción por calle de marzo

Para el mes de marzo es posible observar que a diferencia de junio se tiene que a la calle 35 se le da menor producción en vez de la calle 37 que posee una producción normal la calle 35 estaba ya siendo explotada de manera pareja respecto a sus calles cercanas, excepto la calle 37, la cual disminuyo su producción. Dado esto el plan propuesto para el mes de marzo se presenta en la Figura 25.

| | | F3 | | | F1 | | F4 | | | F2 | |
|-------|---|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | cargador9 | cargador11 | cargador15 | cargador17 | cargador21 | cargador23 | cargador25 | cargador31 | cargador35 | cargador39 |
| Dia 1 | A | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC31 | tareasC33 |
| | B | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC37 | tareasC39 |
| | C | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC41 | tareasC43 |
| Dia 2 | A | tareasC13 | tareasC11 | tareasC7 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC45 | tareasC31 |
| | B | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC33 | tareasC37 |
| | C | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC39 | tareasC41 |
| Dia 3 | A | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC43 | tareasC35 |
| | B | tareasC13 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC31 | tareasC33 |
| | C | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC37 | tareasC39 |
| Dia 4 | A | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC41 | tareasC43 |
| | B | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC45 | tareasC31 |
| | C | tareasC13 | tareasC11 | tareasC7 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC33 | tareasC37 |
| Dia 5 | A | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC39 | tareasC41 |
| | B | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC43 | tareasC35 |
| | C | tareasC11 | tareasC9 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia 6 | A | tareasC13 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC37 | tareasC39 |
| | B | tareasC15 | tareasC13 | tareasC11 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC41 | tareasC43 |
| | C | tareasC9 | tareasC15 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC45 | tareasC31 |

Figura 25: Asignación de tareas en base al plan de producción mes de marzo

4.7.2.2. Validación del modelo en mes Septiembre

Finalmente, para poder observar la producción de del mes de septiembre se presenta el Gráfico 5, donde se observa que la productividad en general es más constante en las calles, exceptuando la calle 19 que sigue con la misma tendencia a ser la más explotada. También se nota que la calle 37 recupera su ritmo normal de explotación en relación al mes de junio. También se observa la baja de productividad de la calle 13.

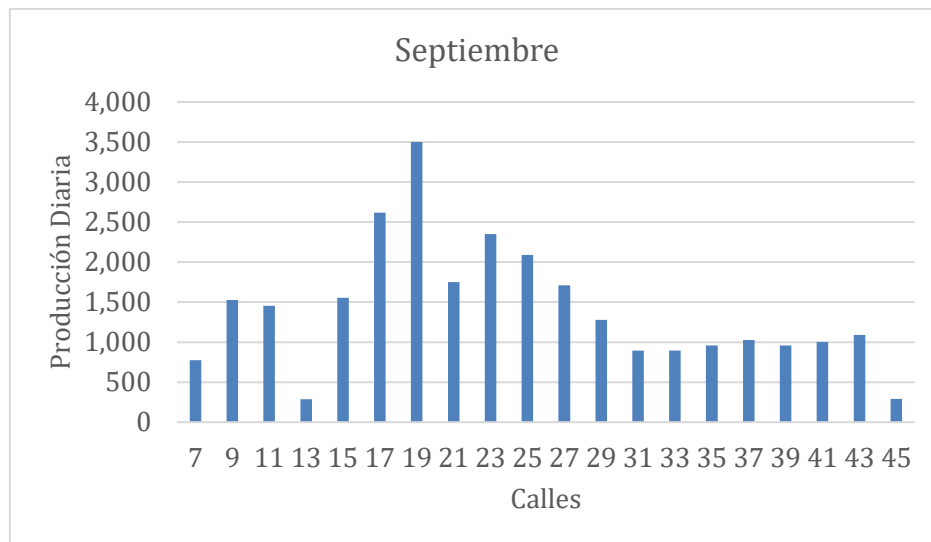


Gráfico 5: Plan de producción por calle de septiembre

En base a esto es que se le realizan algunas modificaciones al plan. En primer lugar, se cambian los roles de la calle 13 con la de la calle 7, decidiendo así disminuir la frecuencia de la tarea de la calle 15. En la fase 1 y 4 se le da mayor prioridad a la calle 17 reemplazándola vez por media por la calle 29 en las tareas del cargador 35, de esta manera se le quita prioridad a esta última, que en el plan es la que aparece con menor productividad en las fases 1 y 4. El plan descrito se presenta en la Figura 26.

| | | F3 | | | F1 | | F4 | | | F2 | |
|-------|---|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | cargador9 | cargador11 | cargador15 | cargador17 | cargador21 | cargador23 | cargador25 | cargador31 | cargador35 | cargador39 |
| Dia 1 | A | tareasC15 | tareasC11 | tareasC9 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC31 | tareasC33 |
| | B | tareasC7 | tareasC15 | tareasC11 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC35 | tareasC37 |
| | C | tareasC9 | tareasC7 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC39 | tareasC41 |
| Dia 2 | A | tareasC11 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC43 | tareasC31 |
| | B | tareasC15 | tareasC11 | tareasC9 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC33 | tareasC35 |
| | C | tareasC7 | tareasC15 | tareasC11 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC37 | tareasC39 |
| Dia 3 | A | tareasC9 | tareasC7 | tareasC15 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC41 | tareasC43 |
| | B | tareasC11 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC45 | tareasC31 |
| | C | tareasC15 | tareasC11 | tareasC9 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC33 | tareasC35 |
| Dia 4 | A | tareasC7 | tareasC15 | tareasC11 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC37 | tareasC39 |
| | B | tareasC9 | tareasC7 | tareasC15 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC41 | tareasC43 |
| | C | tareasC11 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia 5 | A | tareasC15 | tareasC11 | tareasC9 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC35 | tareasC37 |
| | B | tareasC7 | tareasC15 | tareasC11 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC39 | tareasC41 |
| | C | tareasC9 | tareasC7 | tareasC15 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC43 | tareasC45 |
| Dia 6 | A | tareasC11 | tareasC9 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC31 | tareasC33 |
| | B | tareasC15 | tareasC11 | tareasC9 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC35 | tareasC37 |
| | C | tareasC7 | tareasC15 | tareasC11 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC39 | tareasC41 |

Figura 26: Asignación de tareas en base al plan de producción mes de septiembre

4.8. Simulación P-1 2017

El plan P-1, como se explicó en la sección de antecedentes, es aquel que considera todas las actualizaciones que se le realiza al P-0, durante los 3 meses siguiente a la entrega de este último, es decir el P-1 se emite a mediados del mes de junio. Las actualizaciones que considera pueden ser incorporaciones de áreas, obras, requerimiento productivo o algún otro criterio de planificación.

En base a los inputs ingresados al software para realizar la planificación y principalmente a la distribución de tonelaje en las distintas calles de la mina que se tiene como resultado, se propone el siguiente plan para todos los meses del año.

| | | F3 | | | F1 | | F4 | | | F2 | | |
|--------|---|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Calles | | cargador7 | cargador9 | cargador11 | cargador15 | cargador17 | cargador21 | cargador23 | cargador25 | cargador31 | cargador35 | cargador39 |
| Dia1 | A | tareasC7 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC15 | tareasC17 | tareasC19 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC31 | tareasC35 | tareasC39 |
| Dia2 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia3 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC37 | tareasC39 |
| Dia4 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC7 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC41 | tareasC43 |
| Dia5 | A | tareasC15 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC45 | tareasC31 |
| Dia6 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC33 | tareasC37 |
| Dia7 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC39 | tareasC41 |
| Dia8 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC7 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC43 | tareasC35 |
| Dia9 | A | tareasC15 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia10 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC37 | tareasC39 |
| Dia11 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC41 | tareasC43 |
| Dia12 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC7 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC45 | tareasC31 |
| Dia13 | A | tareasC15 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC33 | tareasC37 |
| Dia14 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC39 | tareasC41 |
| Dia15 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC43 | tareasC35 |
| Dia16 | A | tareasC15 | tareasC9 | tareasC7 | tareasC13 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC27 | tareasC29 | tareasC19 | tareasC31 | tareasC33 |
| Dia17 | A | tareasC15 | tareasC7 | tareasC11 | tareasC13 | tareasC21 | tareasC19 | tareasC17 | tareasC23 | tareasC25 | tareasC37 | tareasC39 |

Figura 27: Plan ingresado al simulacro para año 2017

A diferencia del plan P-0 del año 2015, para el año 2017 se consideraron 5 equipos operando en la fase 3.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

El presente capítulo muestra los principales resultados de las simulaciones realizadas. En una primera parte se muestran los resultados de la variabilidad del modelo, donde se define la cantidad de réplicas que se necesitan correr para obtener resultados sin una variación significativa. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de los meses que se utilizaron para calibrar y validar el modelo, Finalmente se muestran las simulaciones realizadas con los inputs del Plan P-1 2017, los cuales posteriormente se analizan en el siguiente capítulo.

5.1. Variabilidad de réplicas del modelo

Para realizar el estudio de variabilidad del modelo se escogió un plan estándar, es decir que no se le dio prioridad a ninguna de las calles, sino que éstas se distribuyeron de manera uniforme en los distintos equipos que se utilizarán. Los resultados obtenidos se presentan en el Gráfico 6.

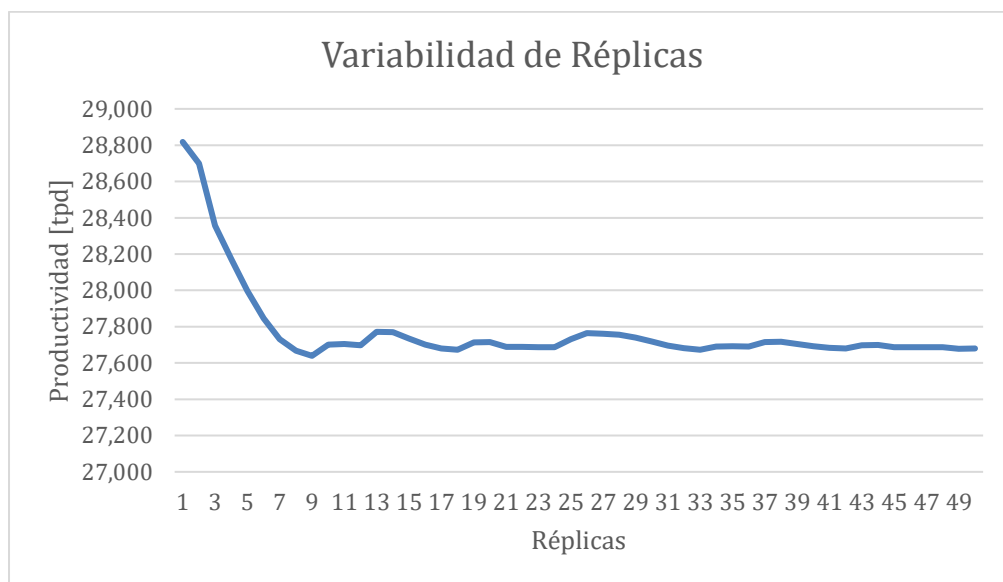


Gráfico 6: Variabilidad de réplicas caso base

De un total de 50 réplicas se procede a calcular la diferencia porcentual de cada una de las réplicas respecto a la anterior, cuyos resultados se presentan en Gráfico 7.



Gráfico 7: Diferencia porcentual de réplicas en caso base

Dado que el error porcentual de los valores de productividad media no varía más de un 0.044% a partir de la réplica 40 en adelante, es que se decide realizar 50 réplicas a de cada una de las simulaciones realizadas.

En base a este resultado es que todos los resultados de las simulaciones realizadas a continuación corresponden al promedio de las 50 réplicas realizadas.

5.2. Calibración y validación del modelo

En esta sección se encuentran los resultados obtenidos a partir de los parámetros ingresados en la sección anterior para calibrar y validar el modelo,

Dado que el principal parámetro que se utilizará para validar el modelo es el tonelaje y tiempos de los LHD, es que en este capítulo se presentará información relacionado exclusivamente a estos datos, mientras que en el ANEXO C es posible encontrar los tiempos de utilización de los chancadores y correas.

5.2.1. Calibración

Una vez ingresados los inputs mencionados en la sección de Caso de Estudio para la calibración del mes de junio, el primer valor que se destaca de la simulación es el tonelaje total y como este se comporta en relación a lo planificado y lo real. En el Gráfico 8 se realiza un resumen que muestra de manera explícita los errores absolutos y relativos, tanto del plan como de la simulación respecto a la realidad. Estos resultados corresponden a la productividad total, dividida en el número de días que posee un solo mes, es decir el promedio mensual de tonelaje.

Del mismo modo es interesante conocer más a detalle cómo se comporta la simulación en relación a cada una de las fases de producción, por lo que en el Gráfico 9 se observan éstos datos.

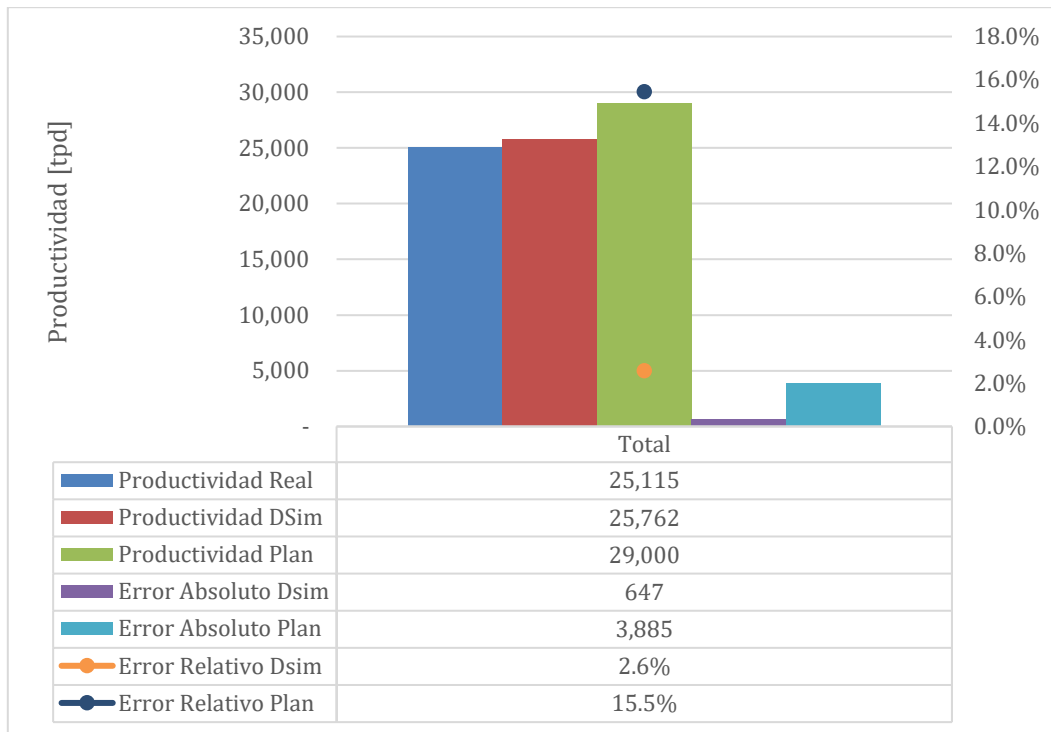


Gráfico 8: Productividad mina mes de junio

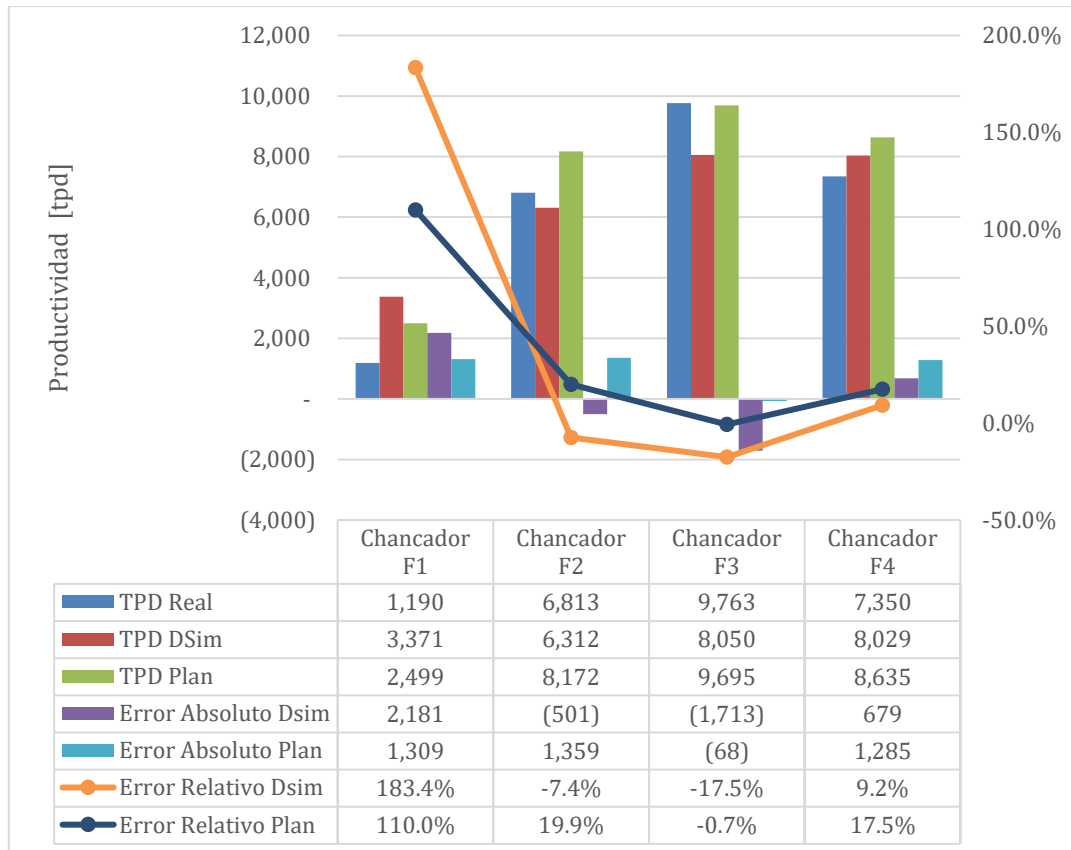


Gráfico 9: Productividad por fases mes de junio

Si bien a primera vista la simulación no se acerca al tonelaje extraído por cada una de las fases, es conveniente observar cómo se reparte la producción en términos de calles, lo cual se presenta en el Gráfico 10.

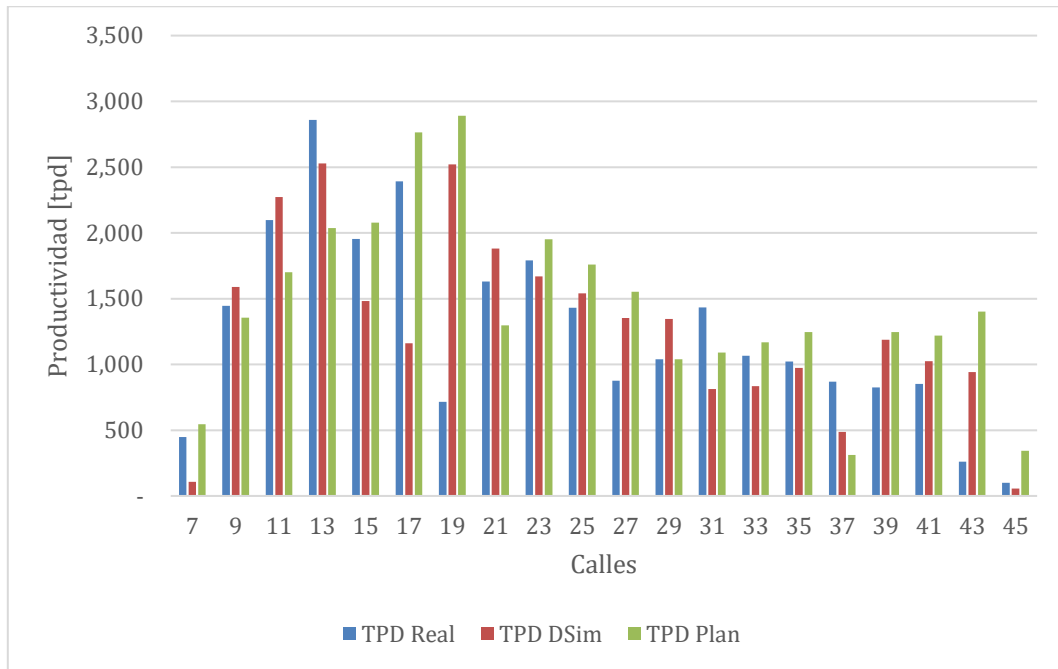


Gráfico 10: Productividad por calles mes de junio

De estos resultados es interesante ver el error absoluto promedio tanto del plan como de la simulación para así poder determinar cuál de los dos es más exacto. En la Tabla 26 se indican éstos valores.

Tabla 26: Error absoluto relativo promedio mes de junio

| | Promedio Error Relativo DSim | Promedio Error Relativo Plan | Promedio Error Absoluto DSim | Promedio Error Absoluto Plan |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Calles F3 | 26% | 16% | 292 | 306 |
| Calles F1 y F4 | 65% | 75% | 666 | 674 |
| Calles F2 | 57% | 99% | 317 | 378 |
| Promedio Ponderado | 52% | 70% | 433 | 464 |

Respecto a los tiempos que los LHD tienen en cada una de sus tareas se tienen los siguientes resultados:

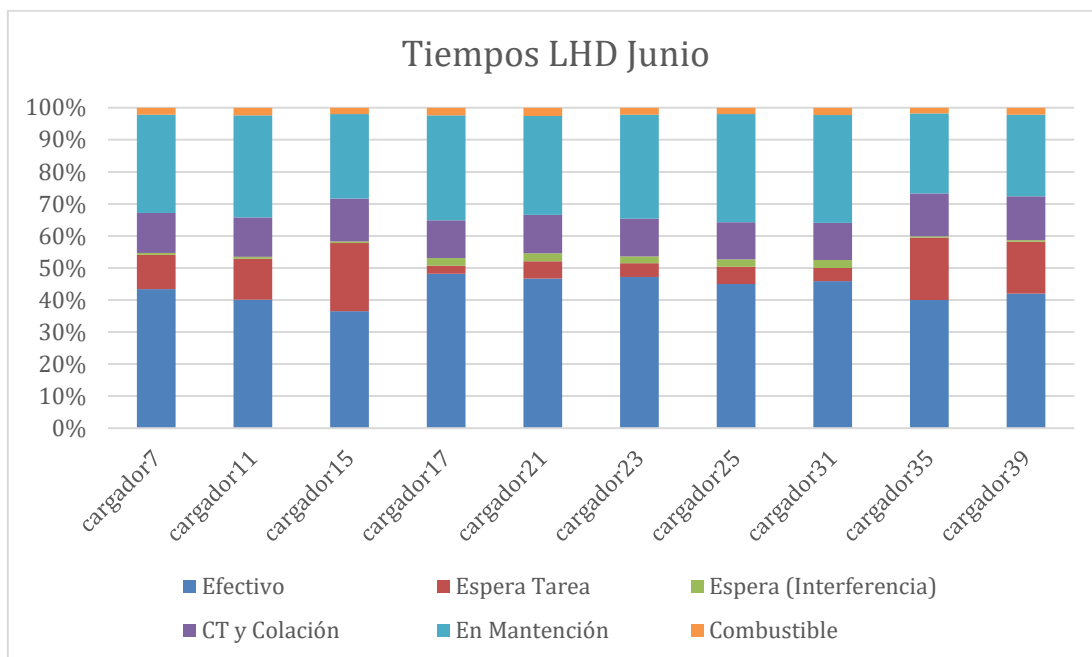


Gráfico 11: Distribución tiempos LHD mes de junio

A partir de los datos obtenidos para la simulación de todo el mes, se puede realizar la conversión a horas por turno de cada una de las actividades, lo cual se observa en la siguiente Tabla 27 en base a los datos tiempos de todos los equipos.

Tabla 27: Horas por turno de actividades de equipos para junio

| Tiempo | Mínimo [hr] | Máximo[hr] | Promedio [hr] |
|-------------------------------|-------------|------------|---------------|
| Efectivo | 2.6 | 3.5 | 3.0 |
| Espera Tarea | 0.5 | 1.7 | 1.0 |
| Espera (Interferencia) | 0.0 | 0.2 | 0.1 |
| CT y Colación | 0.9 | 1.1 | 1.0 |
| En Mantención | 2.1 | 2.6 | 2.4 |
| Combustible | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| Efectivo + Espera | 3.6 | 4.7 | 4.1 |

Se decide incluir la suma del tiempo efectivo con el tiempo de espera para realizar un correcto análisis e interpretación de los datos en el siguiente capítulo.

Respecto a las correas simuladas en el nivel de transporte intermedio, se procede a verificar que estas estén funcionando correctamente, para lo cual se decide mostrar la cantidad de material acarreado por cada una de éstas en el Gráfico 12.

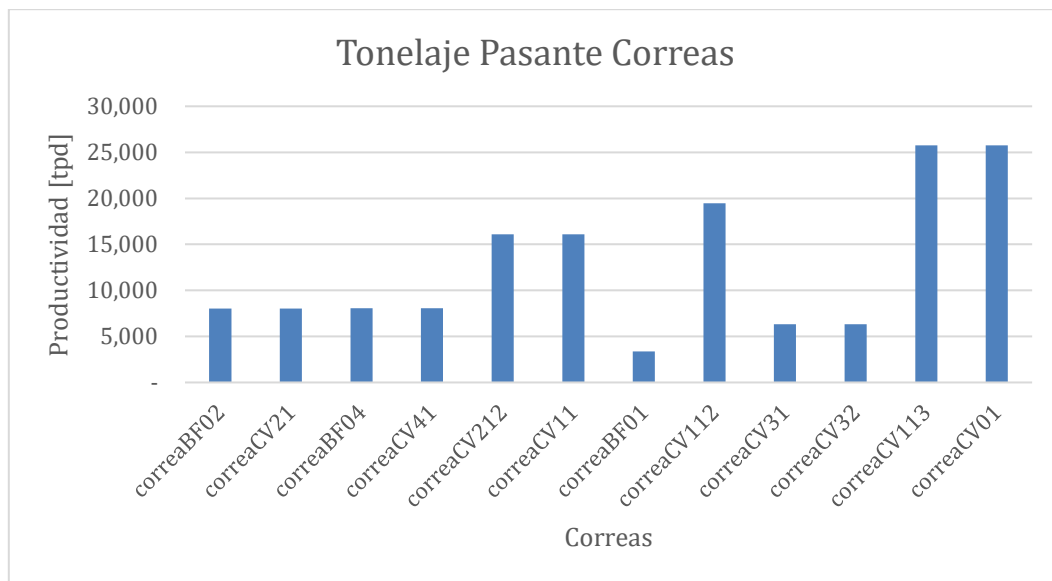


Gráfico 12: Productividad correas mes de junio

Se determina a partir de los valores de error relativo y absoluto promedio de la producción por calle, que la simulación posee una mejor precisión que el plan para el mes de junio, siendo el error absoluto más cercano por 31 tpd, se tienen que estos errores siempre compensan la producción global, incluyendo la sub estimación y sobre estimación, a diferencia que el error del pan que en su mayoría sobre estima la extracción se estima que es suficiente como para pasar el modelo para la etapa de validación.

5.2.2. Validación

A continuación, se presentan los resultados de la validación del modelo en los periodos de marzo y septiembre del año 2015.

5.2.2.1. Validación para el mes de Marzo

Los resultados de la producción total en la mina para el mes de marzo se presentan en los siguientes gráficos, tanto a nivel global de la mina con sus respectivos errores relativos y absoluto, como también por fases, al igual como se presentó para la calibración del modelo.

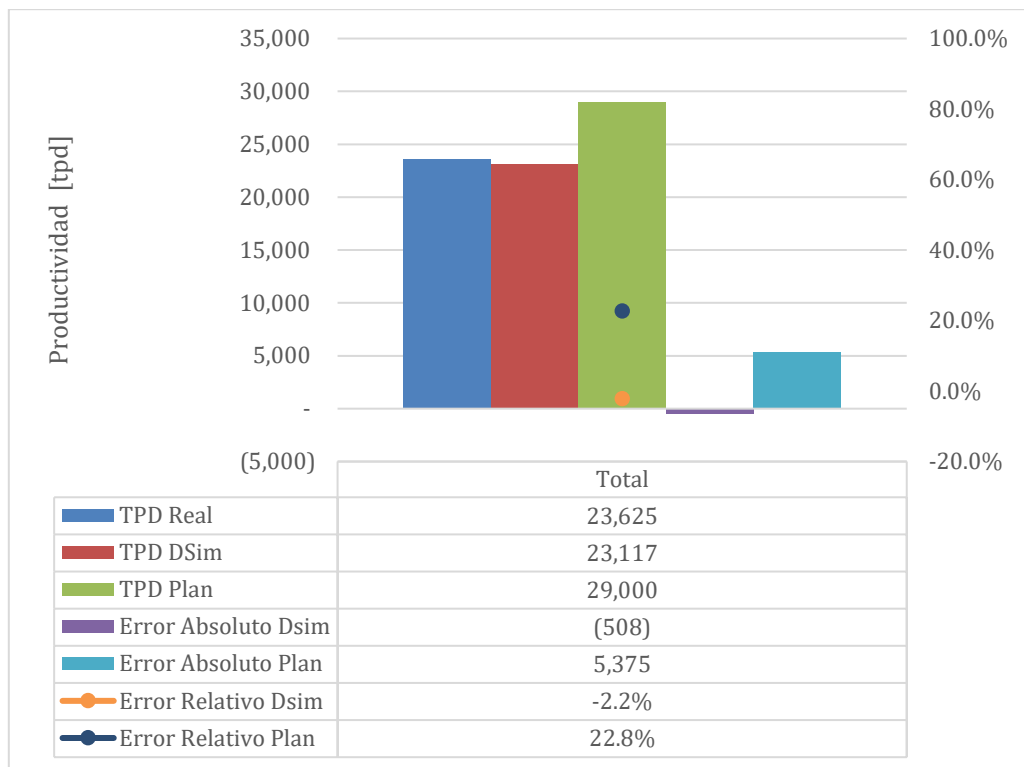


Gráfico 13: Producción global mina mes de marzo

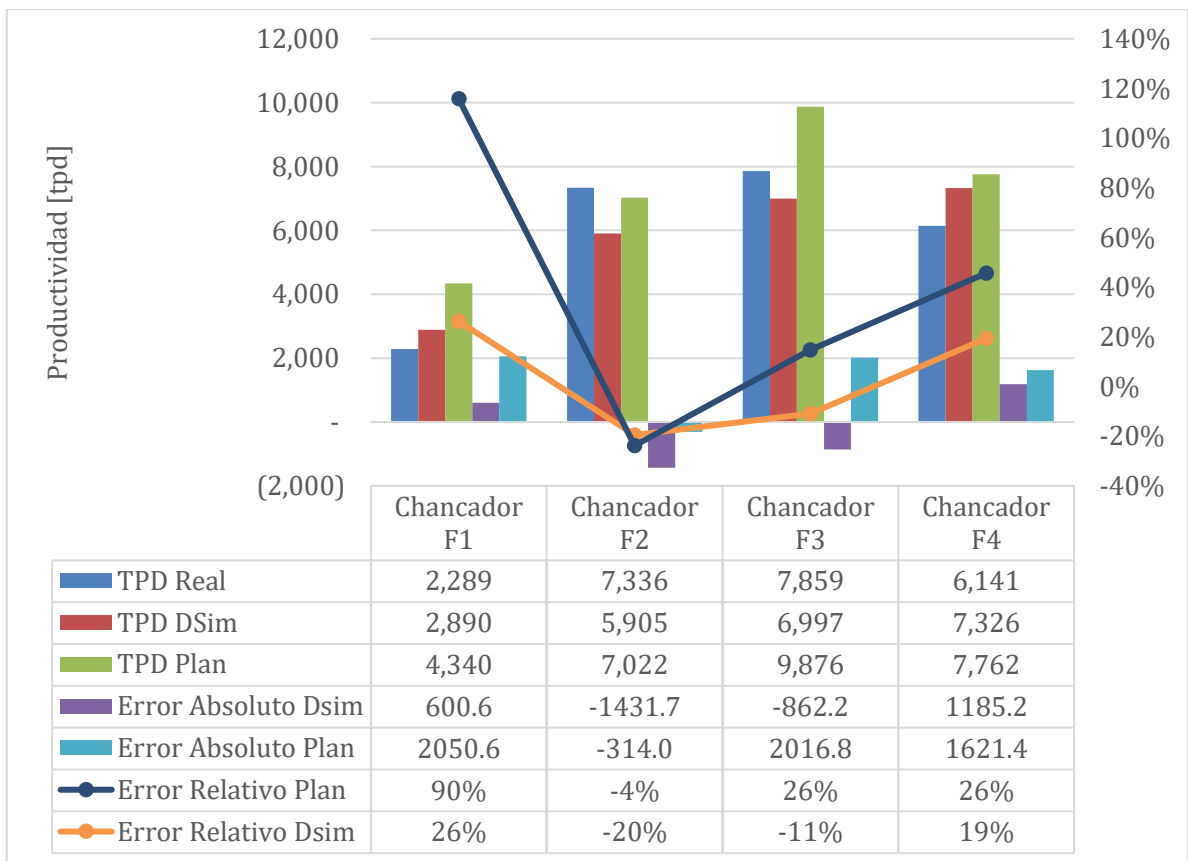


Gráfico 14: Productividad por fases mes de marzo

Si bien los resultados de la producción por fase muestran una tendencia claramente parecida a la del mes de junio en la cual las fases 2 y 3 están sub valoradas por el simulador. Se procede a revisar la distribución de la productividad en cada una de las calles como muestra el Gráfico 15.

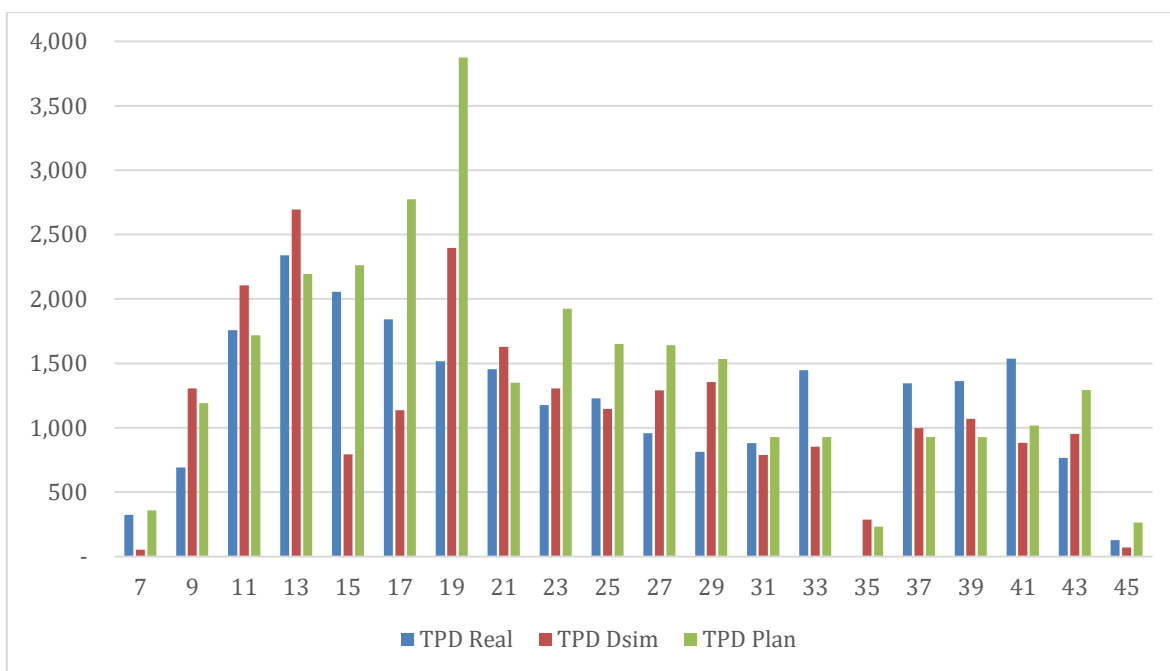


Gráfico 15: Productividad por calles mes de marzo

Los datos que ayudan a interpretar de mejor manera el gráfico de productividad por calles, son los promedios ponderados por el número de calles, de los errores relativos y absolutos de la simulación y la planificación en base a lo que realmente sucedió en la mina.

Tabla 28: Error relativo y absoluto promedio mes de marzo

| | Promedio Error Relativo DSim | Promedio Error Relativo Plan | Promedio Error Absoluto Dsim | Promedio Error Absoluto Plan |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Calles F3 | 54% | 20% | 570 | 185 |
| Calles F1 y F4 | 27% | 64% | 385 | 875 |
| Calles F2 | 34% | 50% | 339 | 395 |
| Promedio | 37% | 48% | 413 | 510 |

Finalmente, también es interesante observar cómo se distribuye el tiempo de los LHD en las distintas actividades, lo cual se muestra en el Gráfico 16.

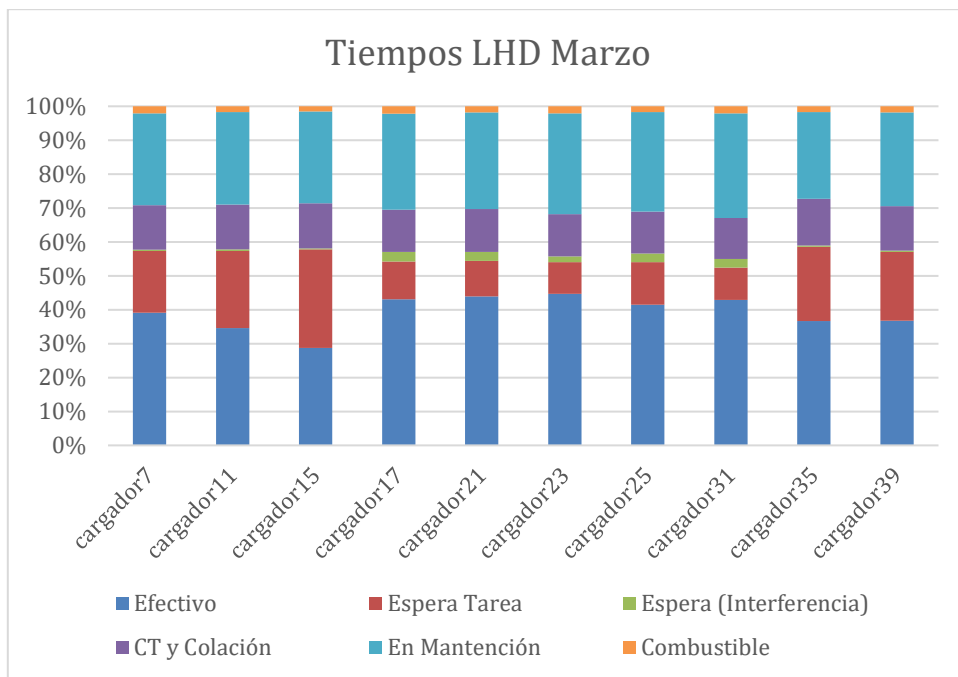


Gráfico 16: Distribución tiempos LHD mes de marzo

5.2.2.2. Validación para el mes de Septiembre

En términos globales de la mina para el mes de septiembre son los siguientes:

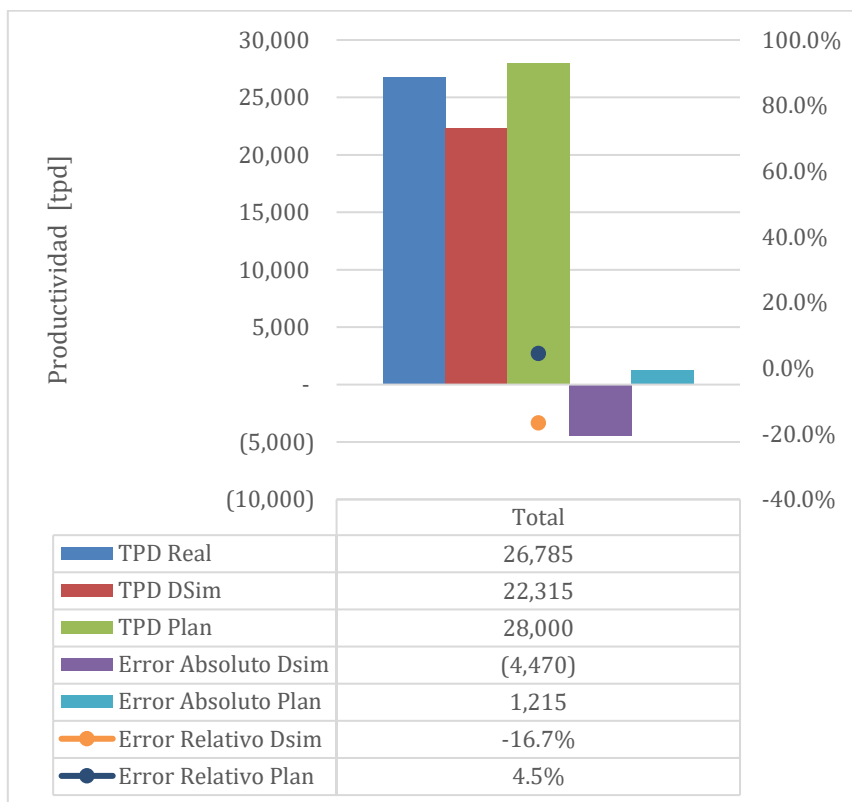


Gráfico 17: Producción global mina mes de septiembre

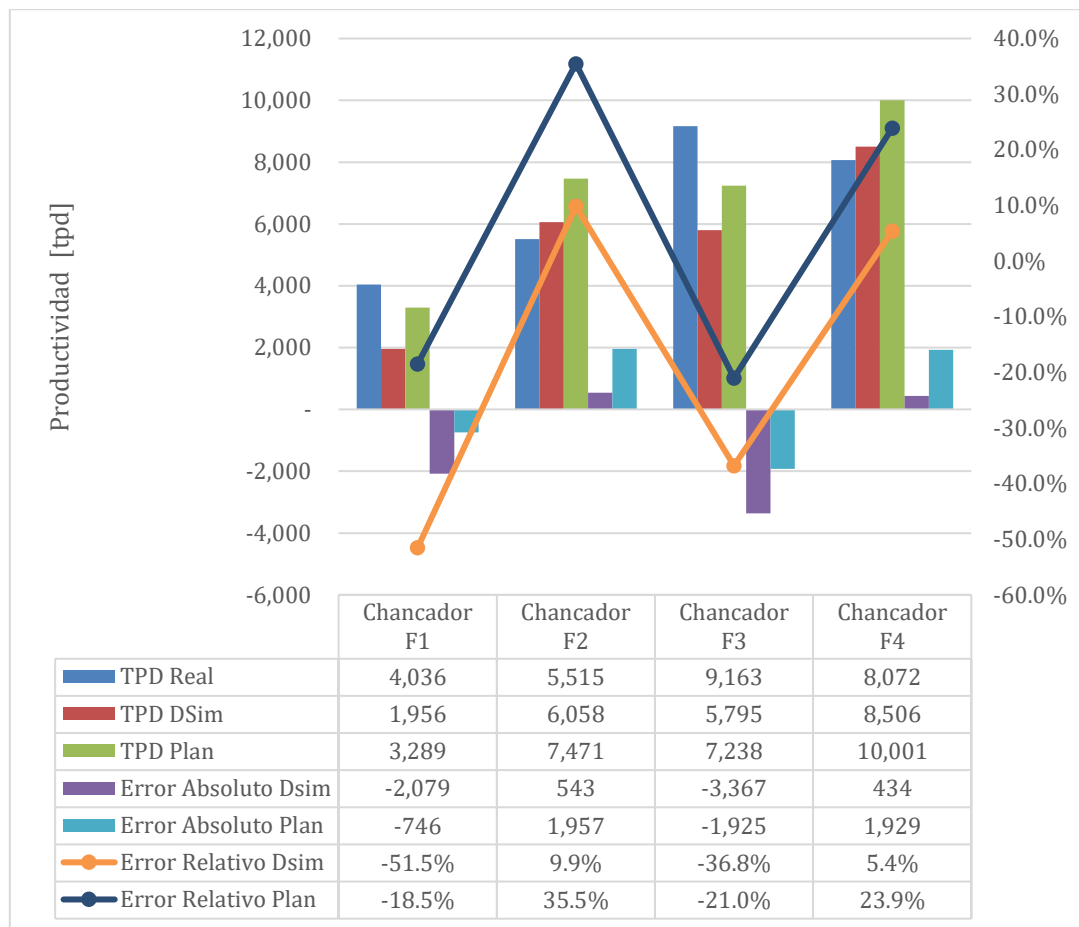


Gráfico 18:Productividad por fases mes de septiembre

A pesar de que los resultados del simulador estén por debajo de lo real y que tengan mayor error absoluto en relación a lo real y al plan, se busca entender el porqué de esta situación. Lo cual será discutido en la sección de análisis.

Si bien los resultados de la producción por fase muestran una tendencia claramente parecida a la del mes de junio, en la cual las fases 2 y 3 están sub estimadas por el simulador. Se procede a revisar la distribución de la productividad en cada una de las calles como muestra el siguiente gráfico.

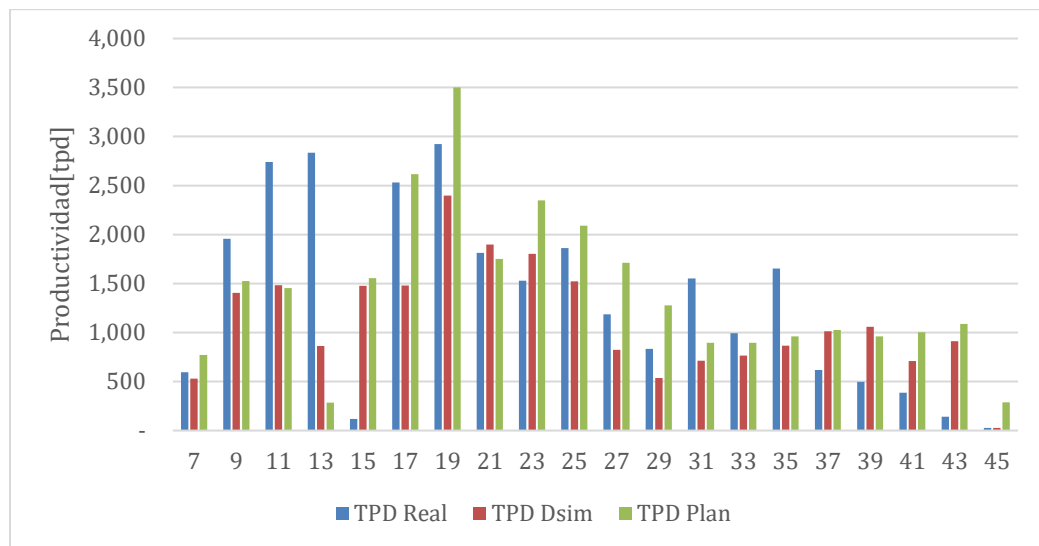


Gráfico 19: Productividad por calles mes de septiembre

Con estos resultados se tiene que el modelo no se logra validar para ambos meses por lo que se procede a realizar un refinamiento de éste.

5.3. Refinamiento del modelo

La primera variable que se variará será la altura de columna al final del mes en estudio, para lo cual no se impondrá una altura límite para los puntos de extracción de la fase 2 y 3, con el objetivo de disminuir los tiempos de espera de los equipos que se producen por no tener puntos disponibles para la extracción en la calle asignada.

Como el mes de septiembre es el que presento mayores tiempos de espera en las fases 2 y 3 se realiza la simulación para este periodo, obteniendo los resultados que se muestran en el Gráfico 20 y el Gráfico 21.

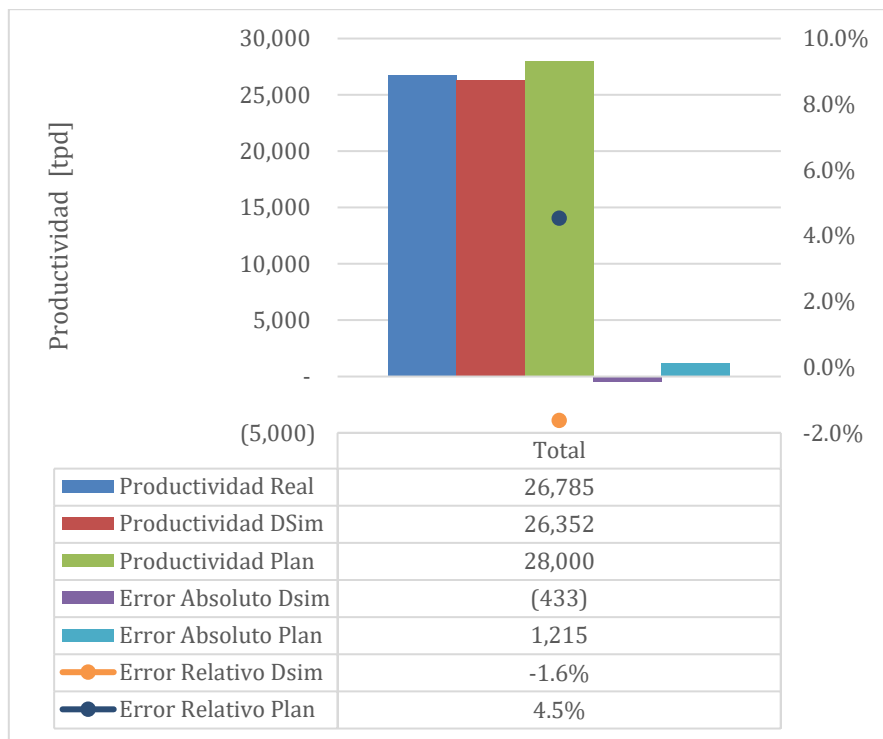


Gráfico 20: Productividad global mina sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, septiembre 2015

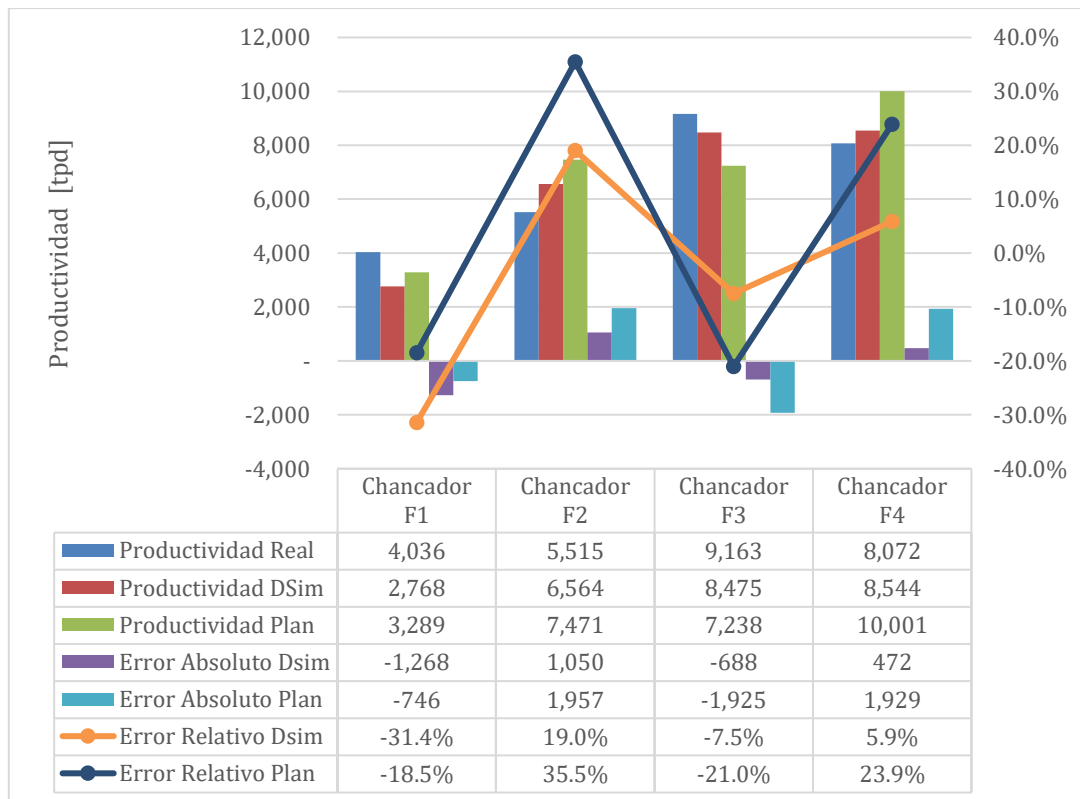


Gráfico 21: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, septiembre 2015

De esta manera se procede a evaluar el modelo para los meses de marzo y junio obteniendo los principales resultados que se observan a continuación:



Gráfico 22: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, marzo 2015

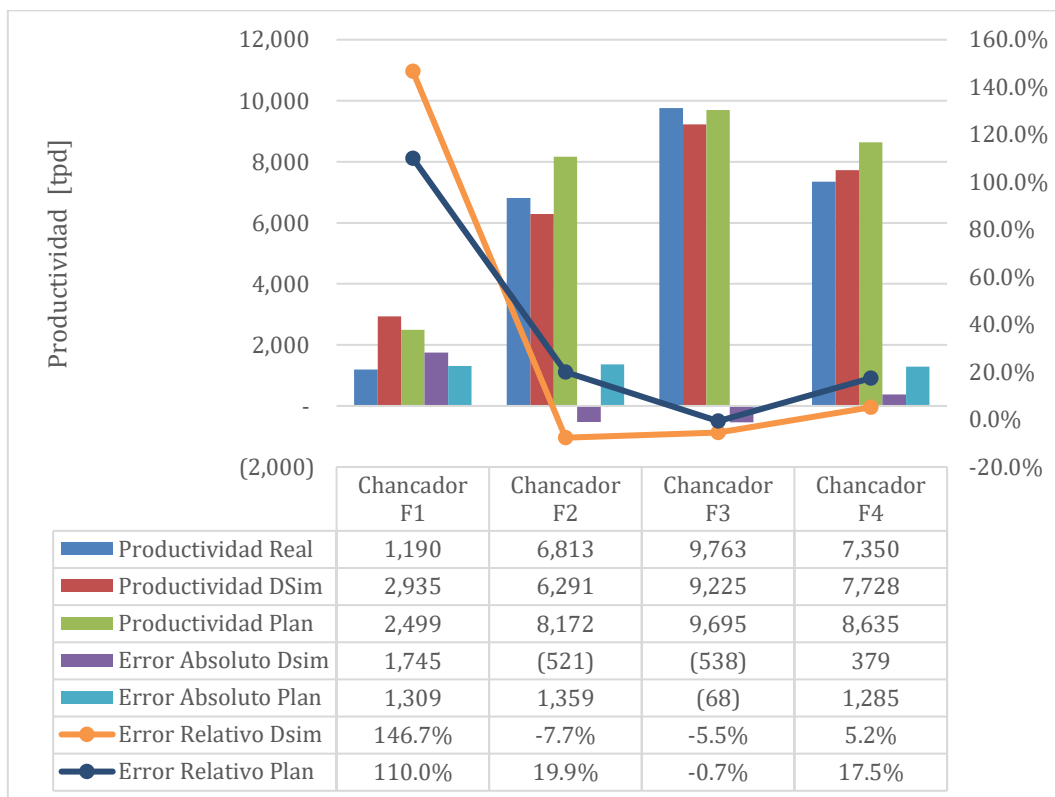


Gráfico 23: Productividad por fases sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, junio 2015

Con estos resultados finaliza la etapa de calibración y validación del modelo, por lo que se procede a realizar las simulaciones para los planes futuros.

5.4. Simulación P-1 2017

Dado que este es el último plan emitido por la Superintendencia de Planificación Minera Metalúrgica, es que se procede a simular el año completo, obteniendo los principales resultados.

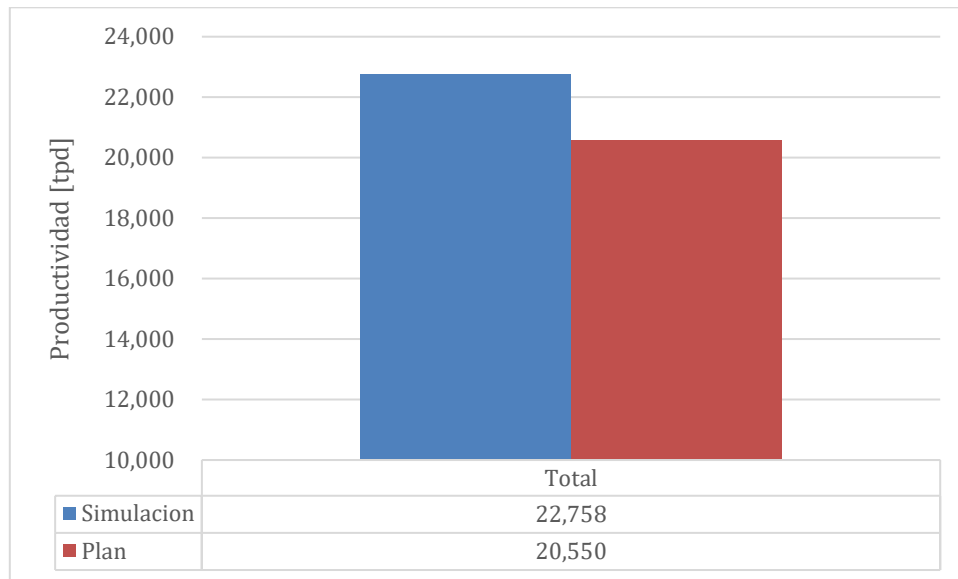


Gráfico 24: Productividad Mina Promedio de los 12 meses, año 2017

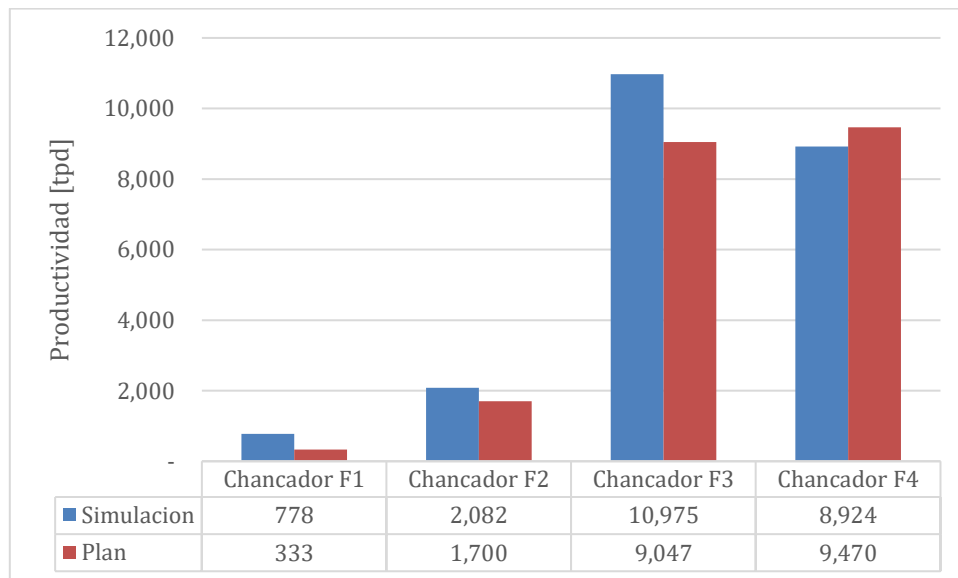


Gráfico 25: Producción mina por fases, año 2017

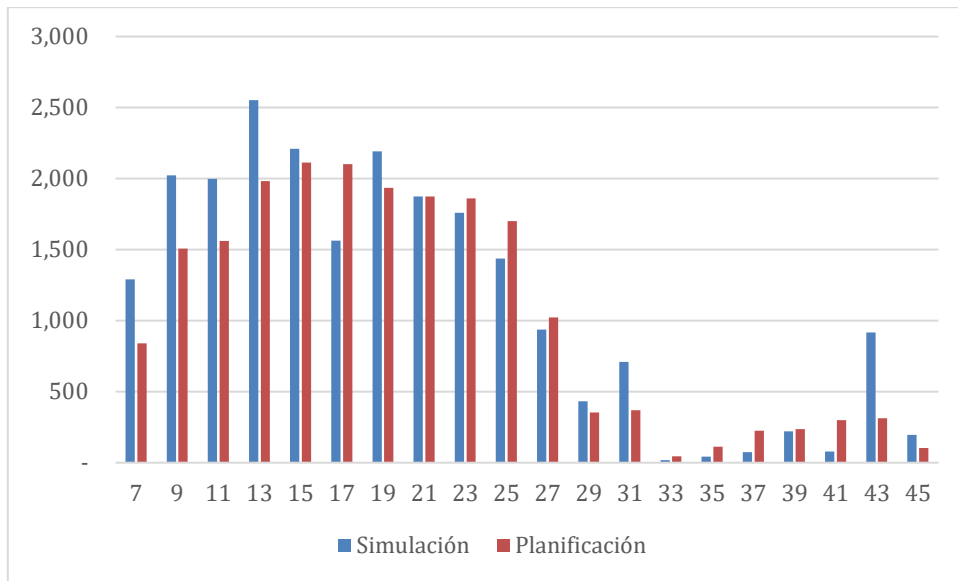


Gráfico 26: Producción promedio por calles, simulación y plan del 2017

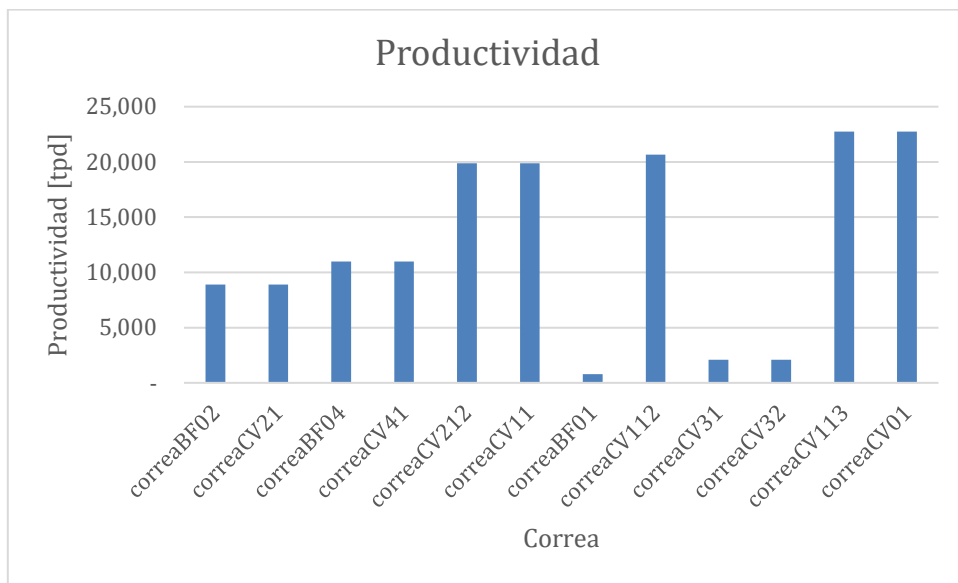


Gráfico 27: Productividad correas promedio, 2017

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente capítulo tiene como objetivo analizar los resultados expuestos anteriormente. Se incluyen parámetros para la calibración y validación, además de una sección adicional en la que se realiza un refinamiento del modelo para que después pueda ser aplicado.

6.1. Análisis Calibración del modelo

Como se indicó en la sección de resultados, la calibración se realizó para el mes de junio, donde en términos generales se puede observar que la producción estimada por Chancadores supera lo observado en la realidad para los casos de las fases 1 y 4, que son justamente aquellas que comparten calles. Para el caso de la Fase 2 y 3 se tienen productividades menores a lo que indica el plan y a lo real, lo cual es posible explicar debido a la diferencia de en las productividades por calles de estas fases, donde las calles 7, 15 y 17 para el caso de la fase 3 poseen productividades que no superan las 1,500 tpd, esto se produce porque estas calles son las que están más alejadas del chancador, por lo que los tiempos de ciclos son mayores, sumado a que existen momentos en el mes en los que los equipos no operan estas calles. Por otro lado, para la fase 2 no se identifica una diferencia determinante de productividad entre lo real y simulado ya que existen calles como la 39, 41 y 43 en la que lo simulado es mayor a lo real, por lo que la variabilidad de productividad en relación a lo real del sector es mayor. El fenómeno es posible que ocurra debido a que en la realidad pueden haber quedado putos como no disponibles por temas de barros, ya que es un sector de la mina que se caracteriza por sufrir este fenómeno.

En la producción se aprecian dos diferencias significativas entre lo que realmente sucedió y lo que dicta el plan, la primera es que la calle 19, pese a presentar el mayor de los tonelajes planeados, fue una de las que menos produjo en la realidad, lo cual puede deberse a distintos factores como trabajos en la calle por infraestructura, bloqueo de la calle por aguas barros u otros que escapan a los alcances de este trabajo y que no son considerados. Por otro lado, se observa que la calle 17 presenta menor producción simulada que real, lo cual es posible que ocurra porque operacionalmente cuando se extrae mineral de la zanja 17 a la 32 se utiliza el chancador de la Fase 3 y no el chancador de la Fase 4 exclusivamente como se planificó.

Lo que se puede deducir es que en vista de que no se extrae mineral de una calle donde se planificó, el equipo que estaba destinado a operarla puede ser reasignado a otras que están disponibles y presentan mayor productividad que la simulación, como lo es el caso de la calle 13, 15 o 17. El mismo fenómeno ocurre con la calle 43, que presenta menor tonelaje mucho menor al planeado y al simulado.

Respecto al tiempo que tiene cada uno de los equipos LHD se puede observar que el tiempo en que efectivamente están operando los equipos, en promedio corresponde a 4.1 horas por turno, que es lo que efectivamente declara la mina que trabajan los equipos por lo cual la simulación funciona de acuerdo a los datos reales que se manejan en faena

según el criterio experto de los profesionales que trabajan en la Superintendencia de Gestión Producción.

Se destaca que los tiempos de espera de los equipos que trabajan en las fases 2 (cargadores 7, 11,15) y 3 (cargadores 35 y 39) son mayores. Este fenómeno ocurre por alguna de estas dos causas:

- Los puntos llegan rápidamente a la altura del mes quedando no disponibles rápidamente.
- Dado que son menos puntos de extracción en las calles, se extrae el tonelaje de coladura de cada punto más rápido y éstos quedan teniendo que esperar que la cuadrilla de reducción secundaria vaya a descolgar los puntos, haciendo esperar al equipo que debe trabajar esa calle.

Acerca del tonelaje extraído por las correas se ve que es totalmente coherente y que las fallas tanto de los chancadores como de las correas no presentan un factor importante a la hora de medir productividad.

Es importante mencionar que en el Gráfico 72, del ANEXO C se observan los tiempos de los estados de los 4 Chancadores, y a pesar de que el modelo considera los tiempos en los que éstos se encuentran en mantención, dado la duración de 1 mes de la simulación es que no se alcanza a cumplir el tonelaje pasante para que a los chancadores se les tenga que hacer mantención.

Las fallas de las correas que se muestran en el Gráfico 73 del ANEXO C presentan valores muy bajos, afectando menos del 5% del tiempo de funcionamiento para todas las correas, excepto para la BF02 que posee fallas que afectan alrededor de 10% del tiempo, lo cual se debe a la distribución uniforme que presenta esta correa para su tiempo entre falla y el alto factor de escala que tiene en su distribución de tiempo de falla. En base a esto, se propone re-estudiar los tiempos de falla de las correas debido a que los datos obtenidos por parte de la Superintendencia de Mantención son escasos y dan una baja tasa de fallas.

6.2. Análisis validación del modelo mes de marzo

En base a la simulación hecho para el mes de marzo se puede determinar que el modelo de simulación acierta con menos de un 3% de error relativo para la productividad total de la mina, con lo que se puede validar el modelo para este criterio.

Otra ventaja es que el modelo también se valida de manera satisfactoria para las fases 1 y 4, debido a que el tonelaje estimado se encuentra entre el plan y lo real.

Para las fases 2 y 3 se vuelve a repetir la sub estimación del tonelaje que realmente puede extraerse, lo cual es probable que se deba a los tiempos de espera que tienen los equipos, que se generan cuando éstos quedan detenidos porque no hay puntos disponibles en una calle, ya sea porque se cumplieron las alturas de extracción o porque la frecuencia de coladura es muy alta y obliga a cachorrear las calles más veces a lo largo del mes. De todas formas, esto se puede solucionar realizando un sistema que le de alternativas de tarea secundarias a los LHD en el caso de que la calle principal no esté disponible.

Otra de las causas de este fenómeno en el que la productividad real es mayor en ciertas calles es que debido a la alta tasa de falla que tienen los equipos y dado que la mayor parte del tiempo no existen 3 de estos en cada una de las fases, se les hayan dado una mayor frecuencia de uso a las calles de las fases 2 y 3, con lo equipos que si están disponibles.

Respecto a los tiempos de los LHD se observa que para los equipos que operan en las fases 1 y 2 poseen un mayor tiempo de interferencia lo cual se debe principalmente que el chancador de la fase 4 queda como no disponible, dado que las tasas de falla de la correa BF02 como la del propio chancador son más altas, de hecho, esto se observa en la sección de anexos, en el Gráfico 75 el caso de los tiempos de las correas y en el Gráfico 74 **Error! Reference source not found.** para el caso de los chancadores.

Finalmente, de acuerdo al error absoluto promedio de la estimación del simulador se tiene que es de 410 tpd en, que vendrían siendo 75.9 toneladas menos que el error absoluto promedio del plan con lo que el plan aun así queda validado para este mes

6.3. Análisis validación del modelo mes de septiembre

En base a los resultados obtenidos de la simulación se aprecia que ésta da cerca de 6,800 tpd menos que lo que se extrajo realmente. Para entender el porqué de estos resultados se procede a observar cómo se comportó el tonelaje extraído por calle en la realidad respecto del plan.

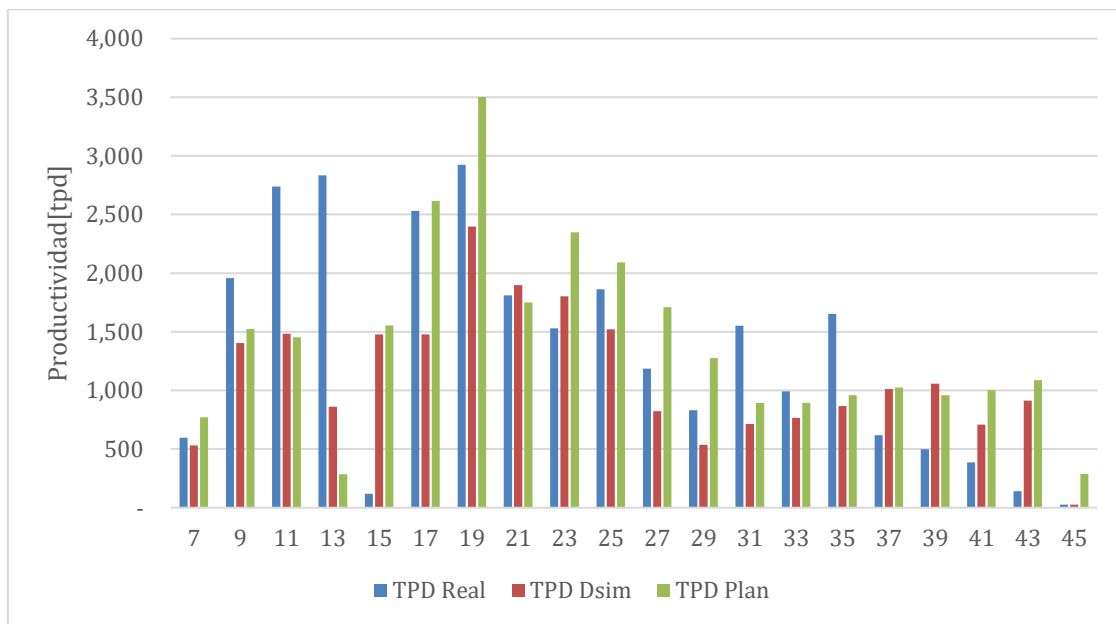


Gráfico 28: Productividad por calles, mes de septiembre

Dada la magnitud de los errores relativos que se observan a simple vista del gráfico es que al igual que en los casos anteriores se calcula el promedio del error relativo de todas las calles donde los resultados se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29: Errores relativos absolutos productividades por calles mes de septiembre

| | Promedio Error Relativo DSim | Promedio Error Relativo Plan | Promedio Error Absoluto Dsim | Promedio Error Absoluto Plan |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Calles F3 | 260% | 280% | 1,041 | 1,176 |
| Calles F1 y F4 | 22% | 23% | 440 | 383 |
| Calles F2 | 108% | 243% | 466 | 510 |
| Promedio Ponderado | 116% | 175% | 601 | 632 |

Se observa que el error absoluto promedio del mes de septiembre es más de 150 tpd mayor al error absoluto del mes de marzo. También se observa del Gráfico 28 que las estrategias de extracción utilizadas fueron muy distintas al plan, como se aprecia claramente en las calles de la fase 3 (de la 7 a la 15) lo cual también se debe a la sobre extracción que se realiza en la operación.

Respecto a los tiempos de los LHD, la tendencia a tener altos tiempos de espera en las fases 2 y 3 continua, tal y como se muestra en el Gráfico 29.

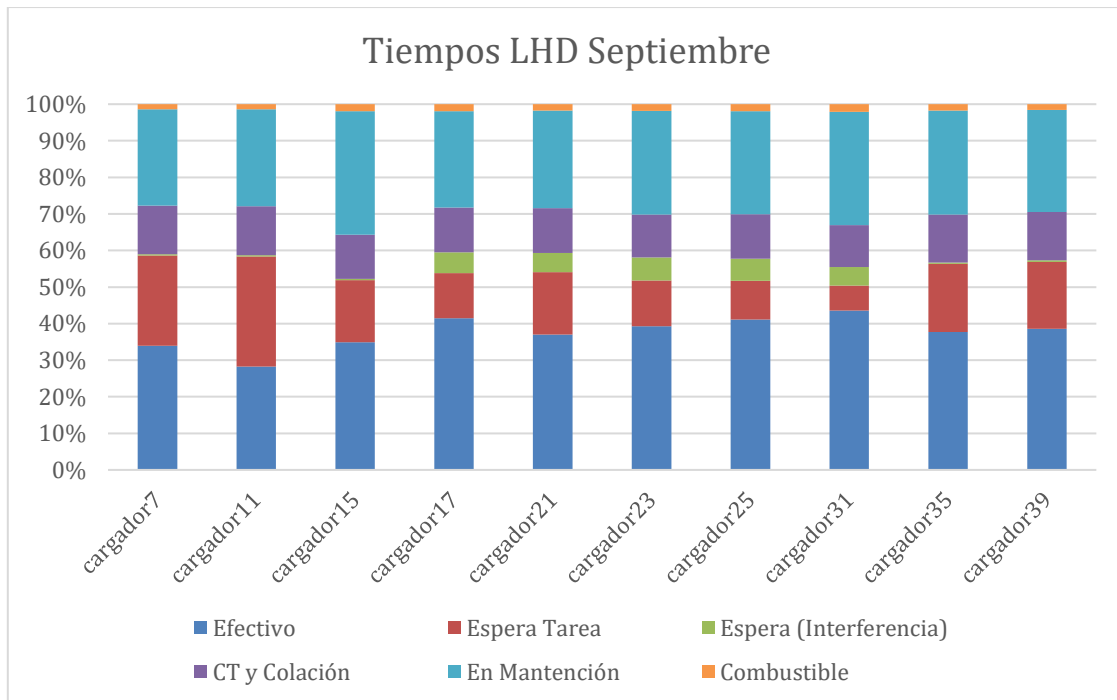


Gráfico 29: Tiempos LHD mes de septiembre

En base a estos resultados es que se propone refinar el modelo ya que no logra validarse para los tres meses, tal

6.4. Refinamiento del modelo

En el Gráfico 20 se observa que la diferencia del que el error relativo del simulador disminuya a solo un -1.6%, este valor a pesar de ser negativo mejora considerablemente en relación a cuando se considera una altura máxima por mes.

El Gráfico 21 muestra como la producción estimada de la fase 3 aumenta, pasando de un error de -3,367 tpd cuando no se considera restricción a uno de -1,925 tpd. Dando de esta manera un tonelaje simulado mayor al planificado y menor al real, lo cual es un resultado esperado, adicionalmente para la productividad de las fases 2 y 4 también se tiene que el tonelaje simulado se encentra entre lo real y lo planificado

Respecto a cómo se comportan las productividades por calle, estas se observan en el Gráfico 30.

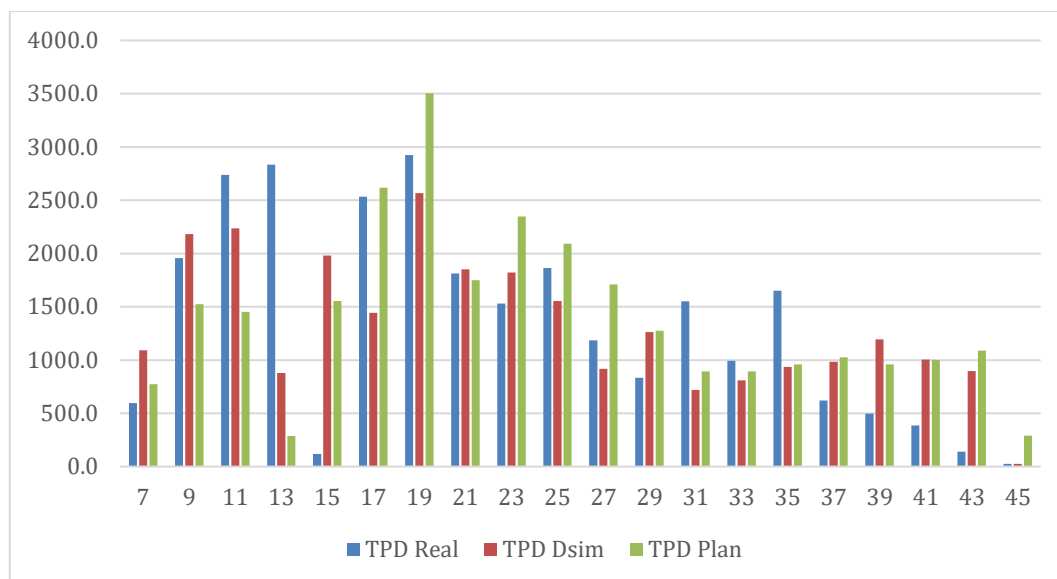


Gráfico 30: Productividad por calles mina sin límite de altura para puntos de Fase 2 y 3, mes de septiembre

A partir del gráfico se puede obtener los errores promedio de las calles por fases, que se indica en la Tabla 30.

Tabla 30: Promedio errores mes de septiembre dejando las fases 2 y 3 sin altura límite

| | Promedio Error Relativo DSim | Promedio Error Relativo Plan | Promedio Error Absoluto DSim | Promedio Error Absoluto Plan |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Calles F3 | 351% | 280% | 1,008 | 1,176 |
| Calles F1 y F4 | 19% | 23% | 392 | 383 |
| Calles F2 | 119% | 243% | 511 | 510 |
| Promedio Ponderado | 142% | 175% | 594 | 632 |

De los datos se desprende que la mayor variabilidad de la productividad ocurre en las fases 2 y 3, en las cuales se puede observar que el tonelaje extraído realmente es muy distinto al planificado, aumentando en algunas calles como la 9, 11, 31 y 35 y disminuyendo en otras, como en la 15, 19, 37, 39, 41, 43. Lo cual demuestra la gran variabilidad que existe en el tonelaje por calles que se extrae.

6.5. Resumen validación del modelo

Finalmente, se aplica esta adaptación del modelo a los meses de marzo y junio, en la que se da mayor holgura a las fases 2 y 3. Obteniendo así los siguientes resultados que comparan ambos modelos desarrollados:

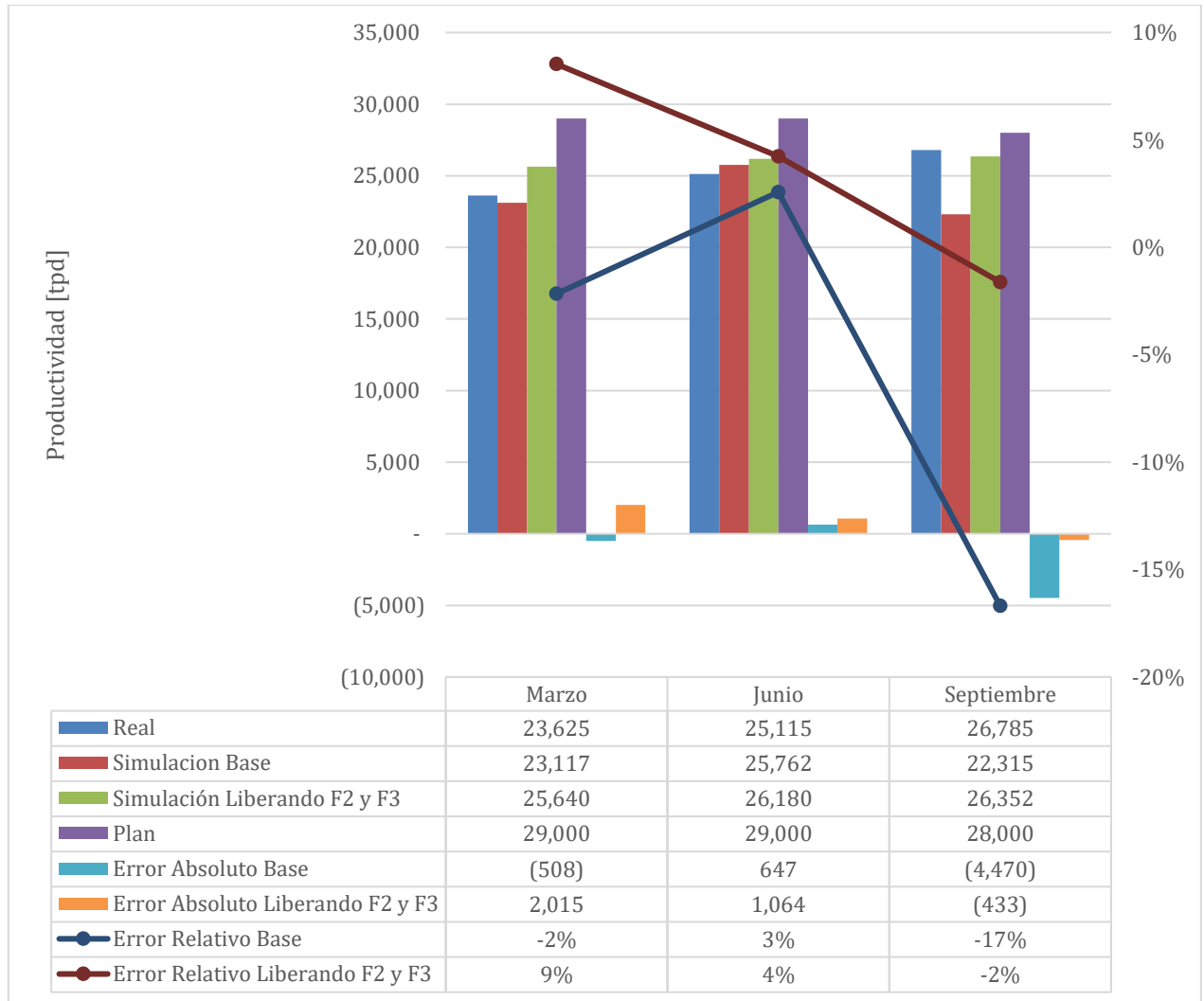


Gráfico 31: Productividad modelos, realidad y errores correspondientes

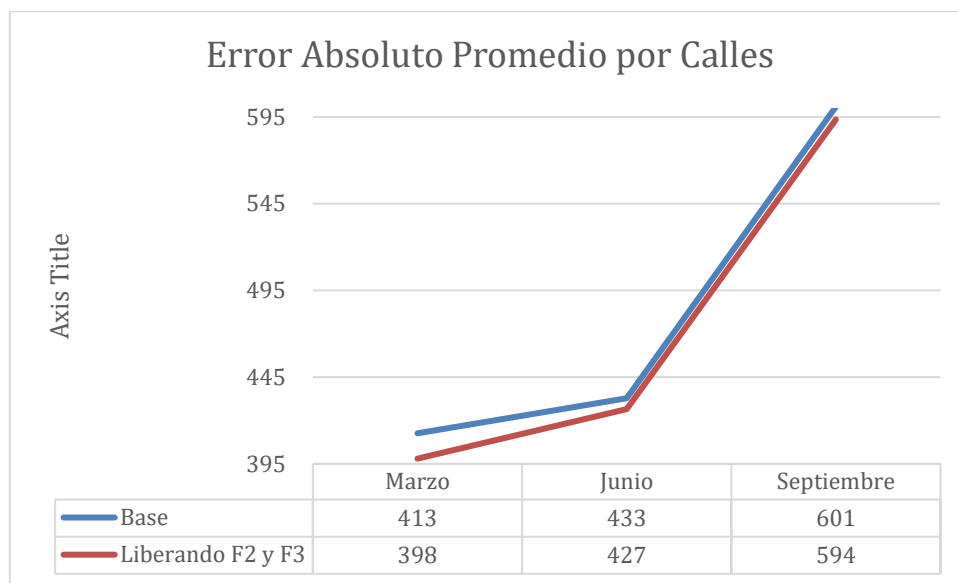


Gráfico 32: Errores promedio absolutos de los distintos modelos respecto a la realidad

Del Gráfico 31 se observa que el modelo en el cual se liberan las alturas de las fases 2 y 3, posee un error absoluto máximo de 2,015 tpd, que se da en el mes de marzo, mientras que para los otros dos meses posee un error absoluto máximo de 1,065 tpd. Una de las posibles causas de que para el mes de marzo se sobre estime la producción es que la producción real de dicho mes sea menor debido al incendio que afectó a todos los niveles el mes de febrero, pudiendo haber comprometiendo parte de la producción al inicio del mes de marzo, bajo este supuesto la producción de marzo podría ser mayor y el error máximo del modelo disminuir.

En el Gráfico 32 se comparan los errores absolutos promedio de las calles de los dos modelos generados, en ellos se puede ver que no poseen una gran diferencia. Por lo que, en base a la productividad total del sistema, los errores del modelo que libera las alturas de la fase 2 y 3 Posee errores tanto que sobreestiman como subestiman la productividad, logrando una productividad total más cercana a la real.

6.6. Simulación P-1 2017

Los resultados de la simulación indican que la productividad de la mina para el año 2017 sería en promedio 2,208 tpd mayor a la indicada en el plan, por lo que en base a los resultados de la calibración existe la posibilidad de que en la realidad el plan pueda cumplirse. Pese a ello, al mirar la productividad por fases, se observa que la fase 3 recibe un tonelaje mayor al planificado en 1,982 tpd, lo cual se debe a que el modelo considera a la fase 2 y 3 con las alturas libres, por lo que no existe un límite para dejar de extraerle a los puntos al menos que estos queden colgados.

Es interesante también ver los tiempos de los diferentes LHD, para poder analizar las utilizaciones de cada uno de estos en las distintas fases.

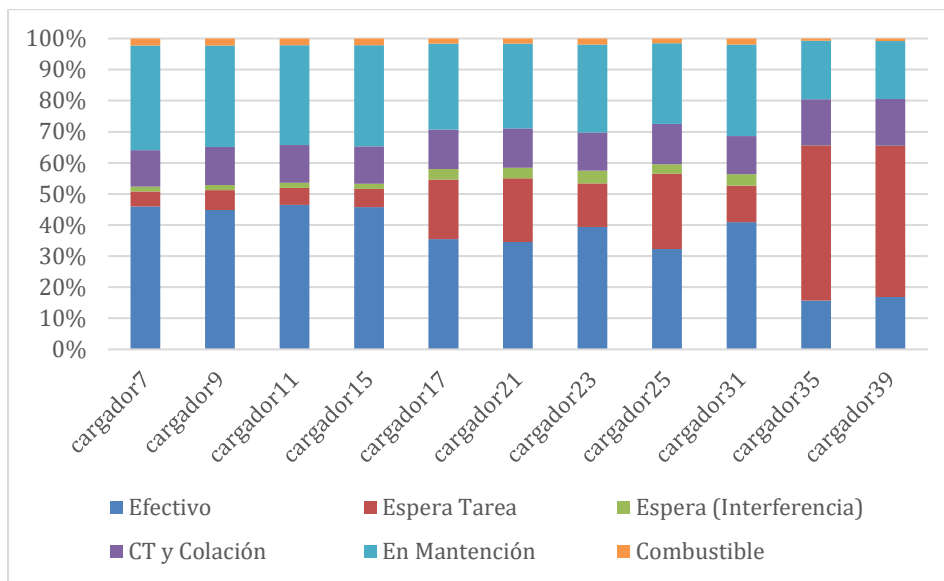


Gráfico 33: Tiempos LHD para el año 2017.

En el gráfico se observa que para la fase 3, es decir dónde están los cargadores 7, 9, 11 y 15, se tiene altas utilidades y bajos tiempos de espera, lo que indica que existen pocos puntos de extracción no disponibles ni calles inhabilitadas. A diferencia de lo que ocurre para los cargadores 17, 21, 23, 25, y 31, que trabajan en las calles de las fases 1 y 4. Estos equipos tienen como promedio de tiempo efectivo 2.9 horas por turno, y 1.4 horas esperando a que existan puntos disponibles. A pesar de que el tiempo efectivo es menor, el tonelaje en la Fase 4 llega a ser el 94% de lo que dice el plan, logrando compensarlo con el tonelaje de la Fase 1, donde la simulación indica que se pueden obtener 444 tpd más que lo indicado en el plan. De esta manera se tiene un error relativo de un 1%.

Finalmente, para el caso de los cargadores 35 y 39, se tiene un promedio muy alto de horas en espera, alcanzando las 4.3 horas, considerando además que los puntos de esta fase se encuentran liberados aquellos que se explotan.

La productividad del sistema de correas se tiene que este no presenta limitaciones respecto movimiento realizado en el nivel de producción, de hecho, el mineral transportado es coherente al recibido en los chancadores de cada una de las fases.

6.7. Análisis Capacidad de Correas

Dado los resultados de las simulaciones realizadas se obtiene que el principal cuello de botella de la producción es la asignación de palas a las distintas fases, ya que las colgaduras de los puntos de extracción y sus respectivos tiempos de reducción secundaria por calle dejan inhabilitado a los LHD de desarrollar las tareas que éstos tienen. Frente a esto surge la necesidad de conocer la capacidad real del sistema de correas, por lo que se procede a realizar simulaciones con los mismos inputs de las simulaciones anteriores, pero esta vez aplicando una carga continua a cada uno de los

chancadores. De esta manera se obtiene que el sistema de correas puede alcanzar una productividad total de 38,176 tpd.

Dado que este valor es superior a 33,000 tpd, que es a la capacidad nominal que se maneja en faena respecto a la productividad del sistema, es que se procede a realizar las simulaciones ponderando el factor Escala de la distribución Weibull que representa el tiempo medio de reparación de equipos. En la simulación se realizaron 5 réplicas para cada uno de los casos que se muestran en el Gráfico 34.

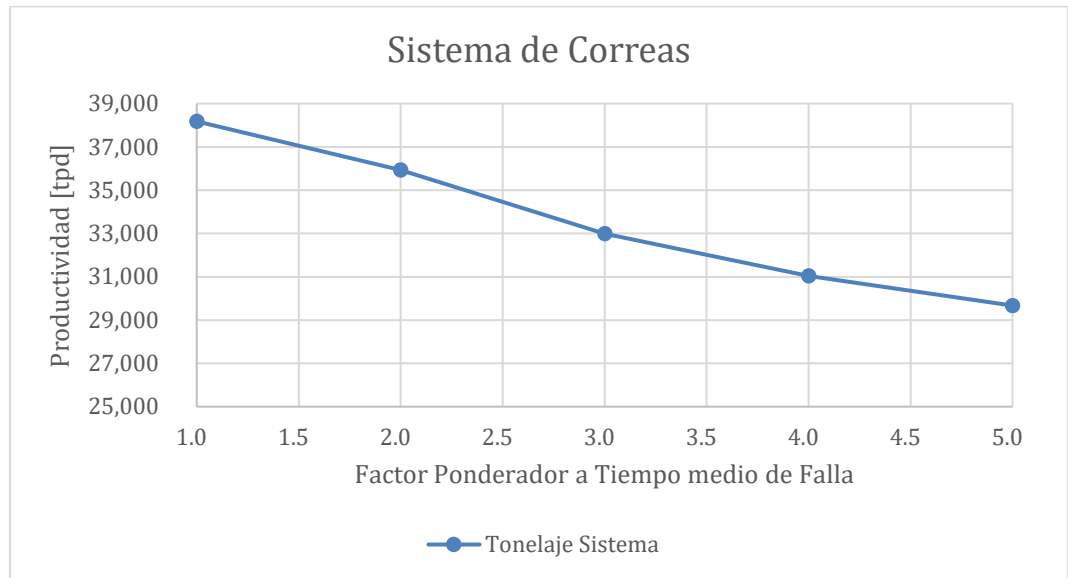


Gráfico 34: Productividad sistema de correas alimentación continua

En el gráfico se puede observar que la productividad total del sistema recién alcanza un valor menor a los 33,000 cuando el factor ponderador de del tiempo medio de falla es igual a 3.

De los resultados se obtiene que existen 2 posibilidades:

- Los datos entregados por la Superintendencia de Mantenimiento están subvalorados o falta información respecto a las fallas que poseen los equipos de la faena.
- Las capacidades ingresadas al simulador están sobreestimadas para cada uno de las correas que pertenecen al sistema.

Por otro lado, se tienen que para las mismas simulaciones se tienen los siguientes tiempos de utilización de equipos.

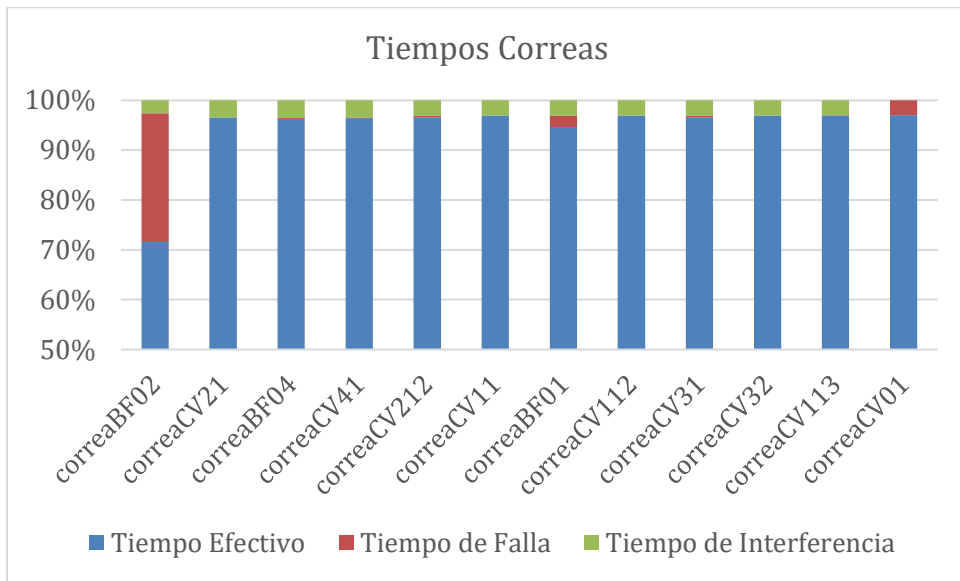


Gráfico 35: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala normal

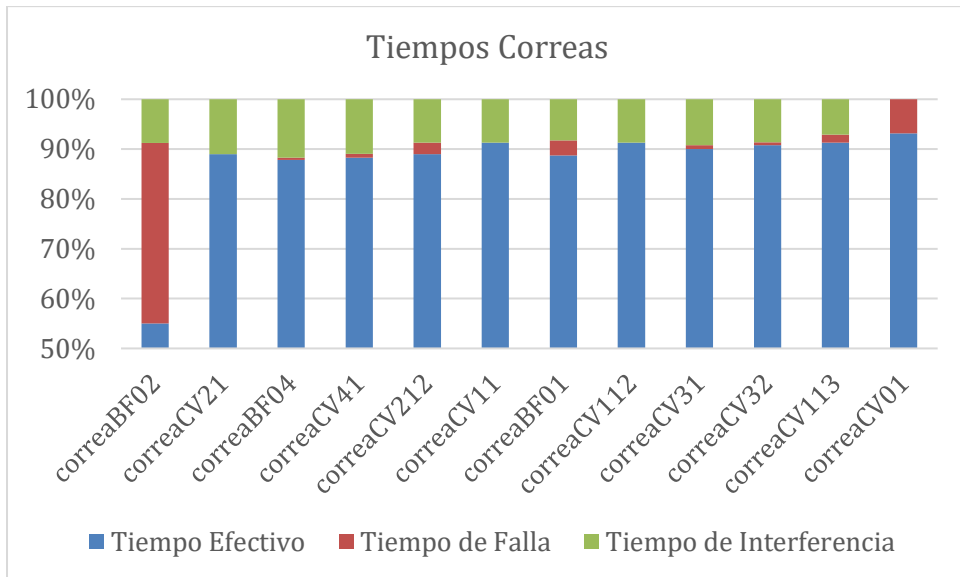


Gráfico 36: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala igual a 3

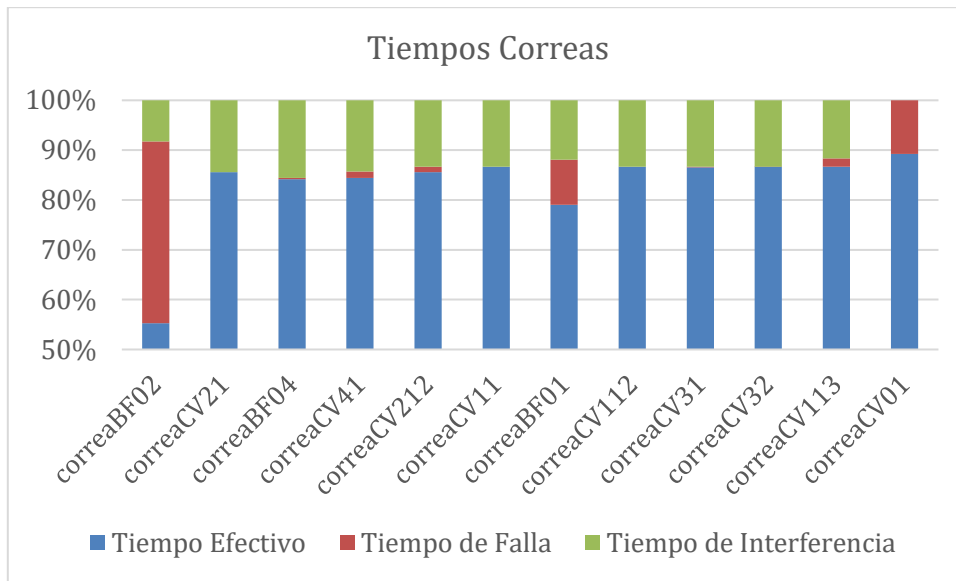


Gráfico 37: Tiempos correas simulación continua, ponderador de factor de escala igual a 4.8

De los gráficos es posible observar como aumenta el tiempo en que las correas están detenida por fallas cuando se aumenta la media de los tiempos de falla, siendo la más importante la correa BF02, que recibe el mineral de la Fase 4.

Finalmente se tiene que el principal cuello de botella que podría existir dentro de las correas es en la Fase 4, alcanzando una utilización real cercana al 55%. Este fenómeno aumentaría los tiempos de interferencias del chancador y por ende haría que los LHD llenar la tolva de este, haciendo que aumenten también los tiempos de interferencia de cada una de las palas que están trabajando en dicha fase. También se podría generar otro fenómeno en el cual aumentan los tiempos de ciclos de las palas dado a que tienen que ir a descargar al Chancador secundario, que en este caso sería el chancador de la fase 1.

6.8. Limitaciones del Modelo

Finalmente, en esta sección se presentan las consideraciones que no se incluyen en el modelo desarrollado,

6.8.1. Interferencias con obras

Dado que en los alcances se planteó que solo se simularía la producción de la mina, en el modelo no se incluyen las interferencias que se generan por trabajos realizados dentro de la mina, tales como desarrollos horizontales, limpieza de calles, desarrollos verticales entre otros. Si es que se integran estas interferencias se espera que la productividad por fase disminuya.

6.8.2. Asignación de tareas

Uno de los criterios que posee el modelo son los que los planes se realizan en base a la asignación de calles que se le hace a cada uno de los equipos. Una de las principales limitaciones de esto, es que se deben considerar los casos de los errores sistemáticos

que se puedan generar debido a las fallas de los equipos, su tiempo de reparación y tiempo entre fallas.

Por otro lado, la limitante de poner tareas a equipos por periodo, en estricto rigor es un error por el hecho de que no le da flexibilidad al plan. Idealmente se debería tener una calle como tarea principal y en el caso de que se esté realizando reducción secundaria en esta se debería ir a la calle secundaria donde se realizan las tareas.

6.8.3. Consideraciones de agua barro

La manera que el modelo tiene de incluir el barro que estará presente en los distintos puntos de extracción es en base a lo planificado por CPlanner, donde se ingresa que estos puntos poseen la altura económica igual a cero, lo que se traduce que en las alturas de los puntos, de cada uno de los periodos planificados son iguales. Esto funciona de manera correcta para los puntos que ya están con la presente condición, pero el modelo no realiza una estimación de los puntos que pueden presentar agua barro durante el desarrollo de la simulación.

Por otro lado, la sobre-extracción mensual que el modelo considera se realiza en base a la altura final del periodo, donde se deja libre para los puntos de las fases 2 y 3.

6.8.4. Estrategia de extracción

A pesar de que la calibración y validación del modelo se realiza de manera exitosa, debido a que se cumple el criterio de que el modelo posea menos de 10% de error relativo en relación al tonelaje real extraído. La estrategia de extracción que se utiliza, es en base a las velocidades de extracción, lo que hace que sea más probable escoger un punto que tenga mayor velocidad de extracción, generando que se priorice el régimen del Caving, dejando para el final las zonas que están en quiebres, esto también es diferente a la realidad porque en la operación en la mayoría de los casos se privilegia la zona en quiebre.

6.8.5. Fallas y Mantenciones

La principal limitación en relación a las fallas y mantenciones es la información que se obtiene desde la mina o en terreno. Debido a que operacionalmente existen errores en la toma de datos, habiendo casos en los que no quedan registros de muchas fallas u otras que quedan registradas con un tiempo mayor al que realmente ocurrió.

El modelo utilizado para la calibración, validación y resultados solo considera las fallas de los LHD de Neumático y fallas tipo "FALLAS", siendo estas últimas las registradas por el sistema como fallas generales menores, que no presentan una definición clara en las que se puedan clasificar como fallas Mecánica, Estructurales o Eléctricos.

6.8.6. Traspaso de mineral en correas

El modelo considera la unión entre correas batch, pero a pesar de esto, el traspaso ocurre de manera instantánea de una correa alimentadora hacia la siguiente. En la

realidad se tienen que, para traspasar el mineral de una correa a otra, existen tolvas en las que el mineral se va acumulando, esto se hace con el objetivo de no tener que detener de inmediato la correa alimentadora. El modelo cada 7 segundo chequea las correas siguientes si está disponible o no, en caso de que no se para de inmediatamente la correa, quedando también como no disponible y con un tiempo de interferencia.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En la realización de los planes mineros a largo y mediano plazo, se consideran varias características de la mina, específicamente en los planes realizados por la Superintendencia de Planificación Minera Metalúrgica de la División El Teniente destacan equipos que se utilizarán por sector, las velocidades de extracción que tiene cada uno de los puntos, puntos en agua barro entre otras. A pesar de esto en la operación minera misma, existe una baja probabilidad de que se cumplan los planes en su totalidad producto de la variabilidad que existe, la cual no es considerada en los valores determinísticos que se utilizan para planificar.

Frente a esto, el uso de modelos de simulación permite incorporar esta variabilidad en los planes mineros, generando diferentes escenarios para un plan realizado por la minera, logrando así mejorar las estimaciones que se realizan de los planes de producción.

A pesar de esto, la utilización de las herramientas de simulación, no son de uso diario en el presente debido a que se necesita tiempo para poder adaptar los modelos a los casos de estudios específicos que se requieren, esto sumado a los tiempos de procesamiento de datos. Ante esto en el presente trabajo se corroboró que el simulador DSim desarrollado por el Laboratorio Delphos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se presenta como una herramienta factible para simular los diferentes sectores de la mina El Teniente, permitiendo obtener resultados de variabilidad de un caso de estudio en tan solo un par de horas, siempre y cuando la red de internet permita hacer uso de los computadores del laboratorio de manera remota.

La metodología de trabajo utilizada en esta investigación puede ser utilizada en cualquier proceso de creación de un modelo de simulación, permitiendo hacerlos de manera simple y rápida. En el mercado se necesitan herramientas que sean adaptables de manera fácil y eficiente, para lo cual el modelo creado se presenta como una opción real y concreta para ser utilizada. A pesar de que el modelo no incorpora todas las variables que se tienen en la realidad, este permite identificar interferencias operacionales que ocurren en el manejo de materiales como también cuellos de botella en el proceso productivo.

Es importante destacar que la visualización en 3D que posee el simulador es útil para poder ir verificando el que cada una de las partes del modelo de simulación funcione correctamente, aparte permite generar la confianza necesaria con el cliente al cual se le están mostrando los estudios realizados.

En particular para el caso de la mina diablo Regimiento se identifica que el principal cuello de botella en el manejo de materiales ocurre en la asignación de equipos en las distintas calles de producción, siendo el manejo de materiales por medio de correas un medio que no es problema. Se logra identificar los altos tiempos de espera de tareas que

tienen los equipos en los momentos en que a las calles donde tienen que ubicar se les aplica la reducción secundaria debido a las tasas de colgadura de los puntos.

El modelo mediante la liberación de una altura límite de extracción al final del periodo de tiempo estudiado, permite considerar la sobre extracción que se realiza en algunos puntos, como también las distintas prioridades que se las dan a algunas calles en la operación.

La validación del modelo de simulación se realiza de manera satisfactoria, alcanzando un error relativo máximo de 9% respecto a la realidad. Es importante destacar que este valor se obtuvo solo para el caso de marzo, que es un mes que se encuentra más cercano al inicio de año, por lo que en teoría no deberá poseer tanta sobre extracción, a diferencia de las simulaciones realizadas para los meses de junio y septiembre la máxima diferencia encontrada entre la simulación y lo real es de 1,064 tpd que corresponde a un 4% de variación. De esta manera se concluye que el modelo de simulación sirve para realizar simulación de todos los meses del año.

Los parámetros más importantes dentro de la simulación son 2:

- El primero es la sobre extracción que se le permite a cada uno de los puntos, lo cual refleja la variabilidad de tonelaje extraído por calle para poder cumplir con la producción.
- Las tasas de fallas de los diferentes elementos mineros. Para el caso de los equipos LHD se tiene que las fallas utilizadas fueron solo dos de las cinco a las cuales se les determinó la función de probabilidad. Esto se hizo porque con esas dos fallas, los tiempos de reparación de los equipos concuerdan con los valores de la realidad. Por otro lado, en el caso de las correas se tienen que el parámetro más importante de la simulación es la duración de las fallas de la correa BF-02, que es la única que posee una distribución uniforme para el tiempo entre fallas y además posee el factor escala del tiempo de duración entre fallas mayor, llegando a las 6 horas.

A partir de los resultados obtenidos se deduce que el modelo creado, en el que se liberan las alturas de extracción, posee un error absoluto máximo de 2,015 tpd por sobre el valor real, de esta manera se estima que para el año 2017 la producción de las fases 1, 2, 3 y 4 del Diablo Regimiento pueden alcanzar la producción anual planificada ya que la diferencia entre lo planificado y la simulación es de 720 tpd.

Respecto a la capacidad de las correas se concluye que en base a la información brindada por la Superintendencia de Mantenimiento de la mina, las correas no representan una limitante o cuello de botella en el manejo de materiales de hecho fue necesario multiplicar por 3 para el factor escala de las distribuciones Weibull que representan los tiempos de duración de fallas de las correas, para poder llegar a las 33,000 tpd que es la capacidad con la que el sistema de transporte intermedio fue diseñado según la operación.

Finalmente se concluye que el modelo puede ser poseer una base teórica sólida que puede ser aplicada otro caso de estudio de una mina explotada mediante el método Block/Panel Caving.

7.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

En base a los resultados obtenidos y a las limitaciones que presenta el modelo se realizan las siguientes recomendaciones para trabajos futuros.

Realizar un análisis de sensibilidad respecto a cómo varían los distintos tiempos de fallas de los equipos LHD a medida que se le agregan otros tipos de fallas. En el presente trabajo no se realizó, dado que con el objetivo de verificar el funcionamiento de las fallas en una primera replica se utilizaron solo las fallas del tipo "FALLA" y la falla por neumático, obteniendo resultados coherentes con lo que ocurre en la realidad.

En relación a las distribuciones de probabilidad de las fallas que se obtienen a partir de los datos históricos recopilados por la Superintendencia de Mantenimiento, se propone realizar un análisis más detallado acerca de la confiabilidad que poseen estos datos, lo cual se puede hacer comparando la base de datos de diferentes años o haciendo mediciones en terreno de manera presencial.

Debido a que el modelo es capaz de registrar las alturas finales de cada uno de los puntos después del periodo de tiempo a analizar, se recomienda realizar un estudio que permita cuantificar la sobre extracción que se les realiza a los distintos puntos en estudio, tanto de la fase 2, como de la fase 3, incluyendo a los que se encuentran en régimen y en quiebre.

Dado que el modelo posee una confiabilidad de un 9% para periodos de un mes, se recomienda realizar la validación y calibración para correrlo por periodos de tiempos mayores, idealmente para un año, con el objetivo de poder evaluar planes realizado a escala anual sin tener que considerar el promedio de todos los meses simulados, como lo fue en el caso de este trabajo.

Respecto a la planificación que utiliza el modelo se recomienda incorporar tareas secundarias a cada uno de los equipos, en los que puedan desarrollarlas si es que se da el caso de que a la calle de la tarea principal se le está haciendo reducción secundaria. En este caso el equipo debería dirigirse siempre y cuando no exista otro LHD trabajando en esa calle.

En la actualidad el modelo no tiene como alcance la consideración de aguas barro, por lo que se propone incorporar una distribución de probabilidad para cada uno de los puntos de quedar en este estado, lo cual se puede realizar en base a la información histórica del barro por sectores de la mina y de cómo los puntos se van viendo afectados por este fenómeno en base a los puntos vecinos afectados y la extracción que se le hace a cada uno de estos.

En relación a la estrategia de extracción se propone incorporar algunas diferentes, en las cuales al tener una calle como tarea se escojan primero los puntos de extracción que se encuentren en quiebre, y una vez que se termine con éstos pasar a los siguientes que se encuentren en régimen, permitiendo realizar sobre extracción a estos últimos solamente, de esta manera se representaría de mejor forma la realidad operacional de la sobre extracción.

CAPÍTULO 8

8. BIBLIOGRAFÍA

- Banks, J. (1999). *Discrete event simulation*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Marietta, Georgia.
- Casalli, A. (2014). *Apunte del curso Fundamentos de Procesos Mineralúrgicos – MI4020*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento Ingeniería Civil de Minas. Santiago: Universidad de Chile.
- Cerda, C. (2016). *ANÁLISIS DE RIESGO ASOCIADO A INCERTIDUMBRE OPERACIONAL*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Cerda, M. A. (2016). *IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DE UN MODELO NUMÉRICO-TEÓRICO PARA DETERMINAR CARGAS TRANSIENTES EN UNA CORREA TRANSPORTADORA*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Contreras, C. (2016). *SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA PREPARACION MENERA EN MINERÍA TIPO BLOCK/PANEL CAVING*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil de Minas. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Desarrollo, G. R. (2015). *Plan de Negocios y Desarrollo 2015*. CODELCO, Division El Teniente. Rancagua, Chile: GRMD-SPL-INF.
- Elidio Labão, A. P. (1999). *PROPOSTA PARA SISTEMATIZAÇÃO DE ESTUDOS DE SIMULAÇÃO*. São Paulo.
- Gomez, R., & Correa, A. (2011). *Análisis de implementación de sistemas de bandas transportadoras en patios de almacenamiento en empresas de minería de carbón con simulación discreta y diseño de experimentos*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, Colombia: Revista Boletín Ciencias de la Tierra.
- Gonzalez, S. (2015). *Análisis de la densidad de fallas mayores (P21) en la mina El Teniente*. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Hall, B. E. (2000). *Simulation Modeling of Mining Systems*. Massmin 2000.
- Inc, C. (2013). *R1600H Underground Mining Loader*.

- Le-Feaux, R. (s.f.). *Manejo de materiales en explotaciones subterráneas*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas. Santiago: Universidad de Chile.
- Manriquez, F. (2015). *Evaluación de la incertidumbre geológica y operacional en planes mineros de corto plazo en faenas a cielo abierto*. Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Santiago, Chile.
- Manzur, R. (2015). *Productividad determinada por simulaciones de un sistema minero subterráneo agregado por niveles*. Universidad de Chile, Ingeniería Civil de Minas, Santiago, Chile.
- Marcelo Fioroni, T. B. (2008). *Concurrent simulation and optimization models for mining planning*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.
- Mayer, Z., & Kazakidis, V. (2007). *Decision Making in Flexible Mine Production System*. Journal of Construction Engineering and Management.
- Robles, F. (2016). *ESTRATEGIA ALTERNATIVA CONSUMO DE RESERVAS NUEVO NIVEL MINA*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil de Minas. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Salazar, E. S. (2015). *Prueba piloto software DSim*. CODELCO, Gerencia de proyectos de la División El Taniente, Santiago.
- Salazar, M., & Ramirez, M. (2016). *Análisis de productividad y colgaduras en puntos de extracción. Validación entre fuentes de información GMIN y GRMD*. Andres Brzovic.
- Shannon, R. (1975). *System Simulation: The art and Science*. Englewood Cliffs: Prentice - Hall.
- Troncoso, S. (2006). *Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Vargas, M. (2011). *MODELO DE PLANIFICACIÓN MINERA DE CORTO Y MEDIANO PLAZO*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Vienne, J. (s.f.). *Apuntes planificación minera subterránea*. Universidad de Santiago, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil en Minas., Santiago.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A

A continuación, se muestran los datos utilizados para obtener las curvas de distribución de probabilidad de las fallas de los equipos, a cada una de estas curvas se les realizó un test Chi - Cuadrado para saber cuál es la confiabilidad de representación de la curva respecto a los datos reales, estos valores se presentan en las tablas de esta sección.

9.1.1. Distribuciones de Probabilidad de Chancadores

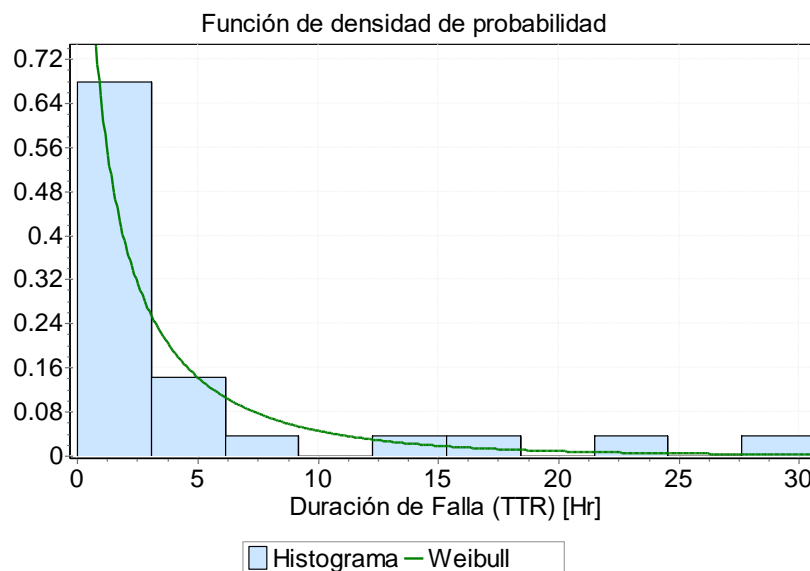


Gráfico 38: Densidad de probabilidad de la duración de falla por Plate Feeder

Tabla 31: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla por Plate Feeder

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 7 | 0.109 | 1.239 | 0.99 |

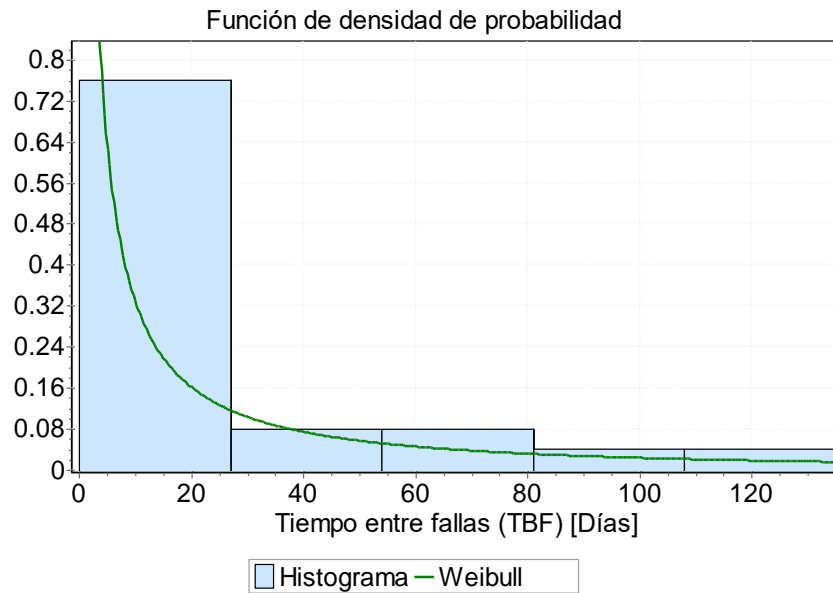


Gráfico 39: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas por Plate Feeder

Tabla 32: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre falla por Plate Feeder

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 2 | 0.043 | 0.10258659 | 0.95 |

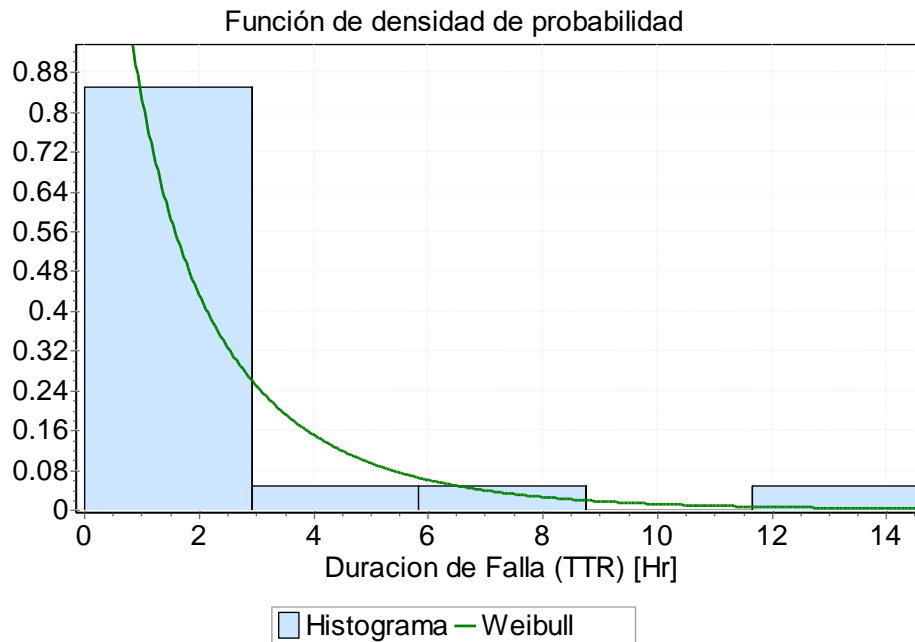


Gráfico 40: Densidad de probabilidad de la duración de falla Hidráulica

Tabla 33: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Hidráulica

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 2 | 0.1093 | 0.21072103 | 0.9 |

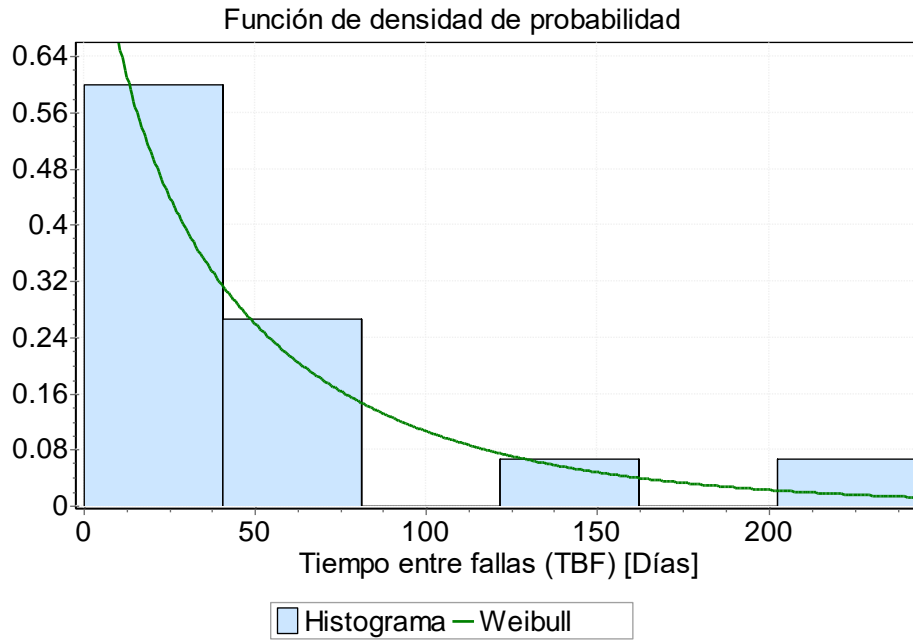


Gráfico 41: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Hidráulicas

Tabla 34: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Hidráulicas

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 3 | 0.78132 | 1.00517401 | 0.8 |

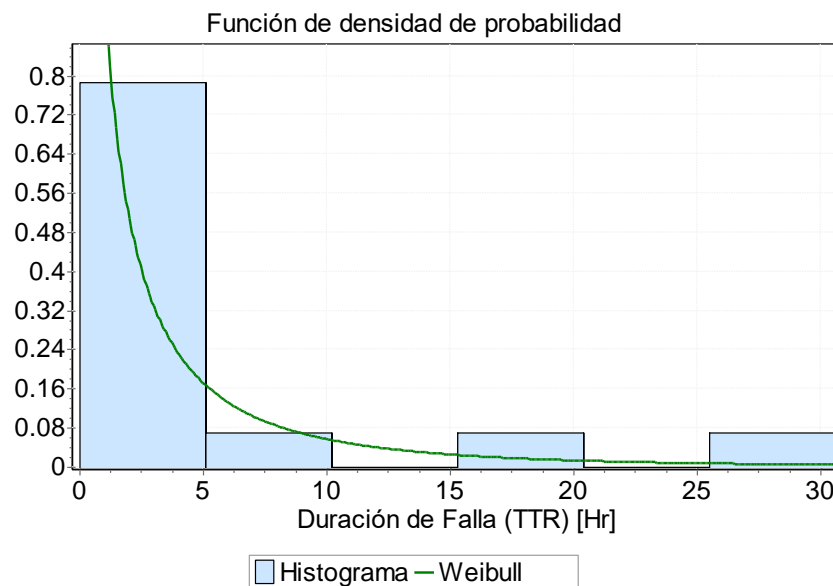


Gráfico 42: Densidad de probabilidad de la duración de falla por Cilindro

Tabla 35: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla por Cilindro

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 3 | 0.9372 | 1.005174 | 0.8 |

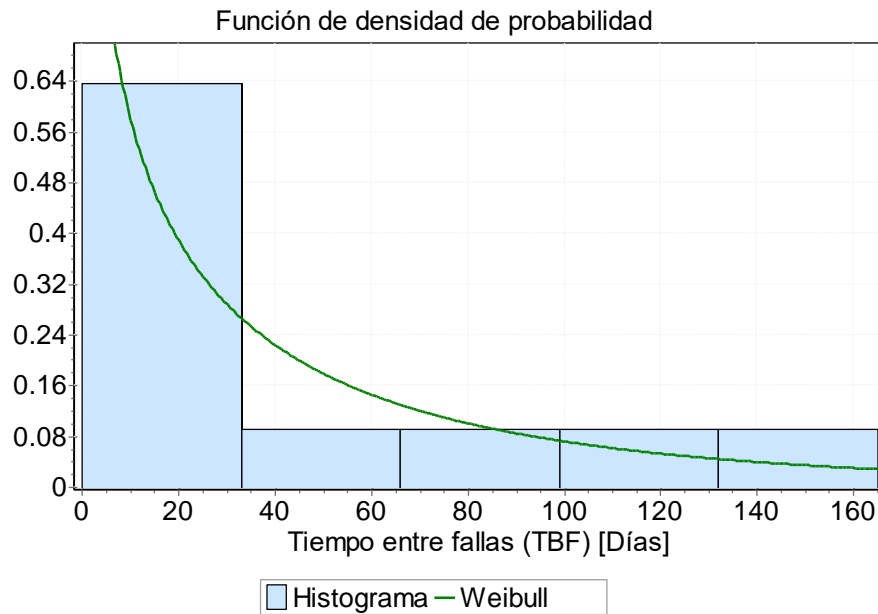


Gráfico 43: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas por Cilindro

Tabla 36: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas por Cilindro

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de Confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 3 | 2 | 0.28614 | 0.325038 |

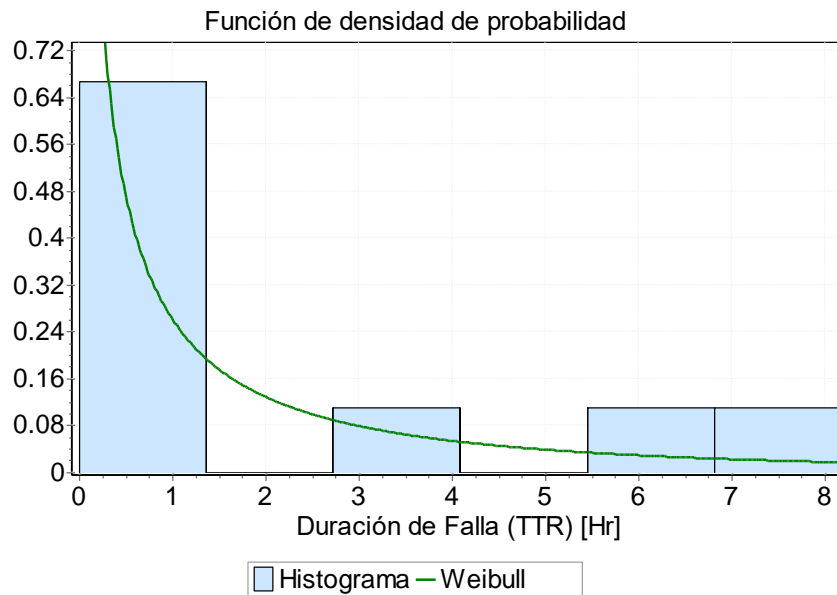


Gráfico 44: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 1

Tabla 37: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 1

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 3 | 1.88 | 1.91610814 | 0.59 |

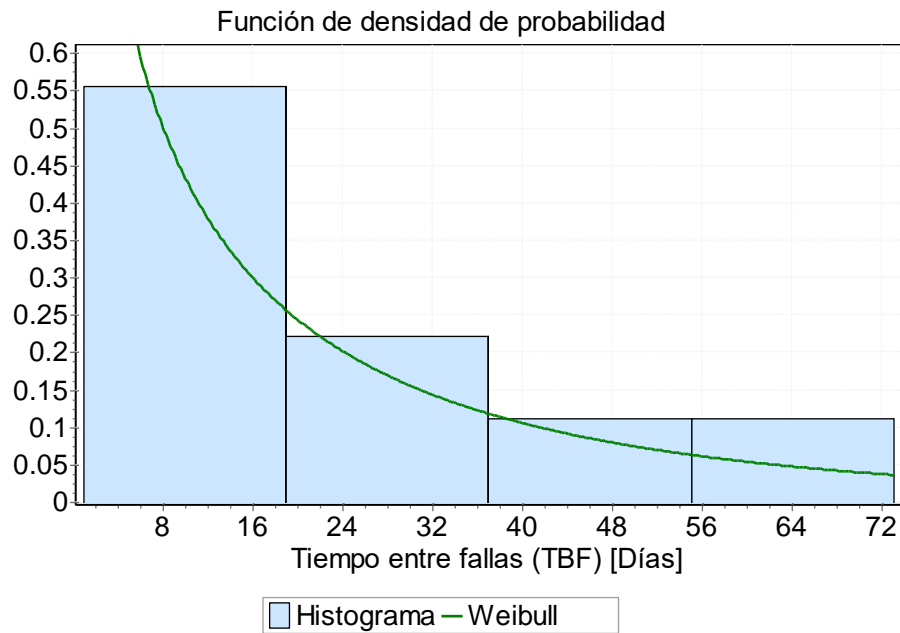


Gráfico 45: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 1

Tabla 38: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 1

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 2 | 0.345 | 0.372659156 | 0.83 |

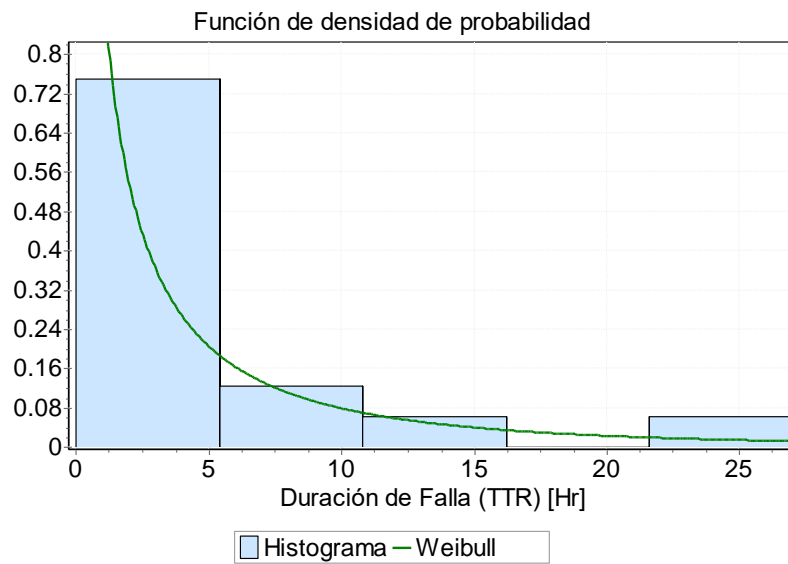


Gráfico 46: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 2 y 3

Tabla 39: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 3 y 3

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 2 | 0.4528 | 0.471444667 | 0.79 |

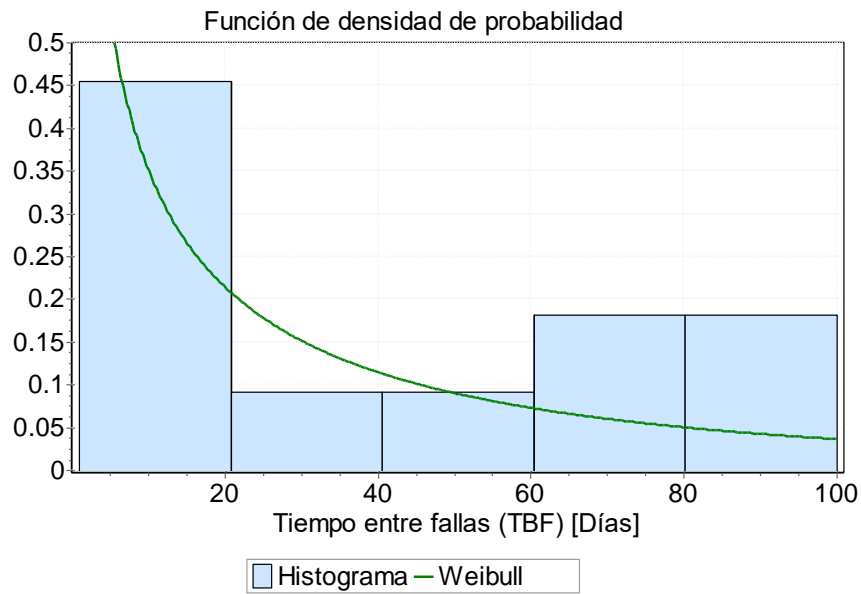


Gráfico 47: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3

Tabla 40: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 2 | 0.63133 | 0.657008134 | 0.72 |

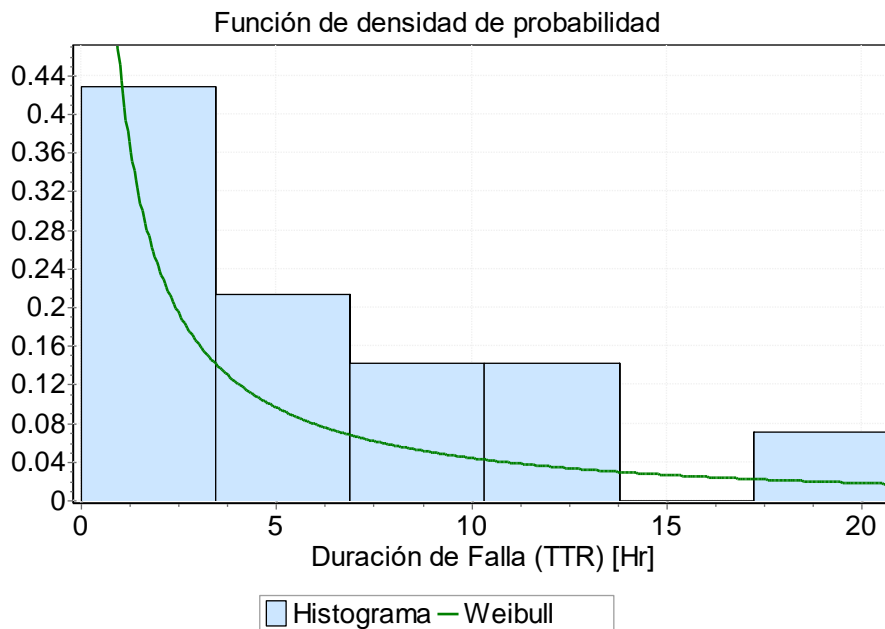


Gráfico 48: Densidad de probabilidad de la duración de falla Estructural en Chancador Fase 4

Tabla 41: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla Estructural para Chancador Fase 4

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 3 | 0.35039 | 0.351846318 | 0.95 |

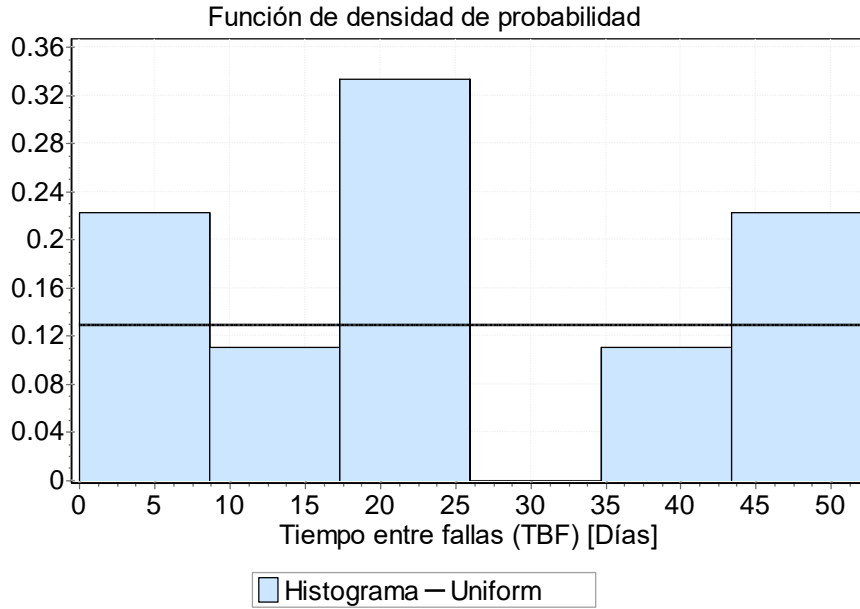


Gráfico 49: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas Estructurales en Chancador Fase 2 y 3

9.1.2. Distribuciones de Probabilidad de Correas

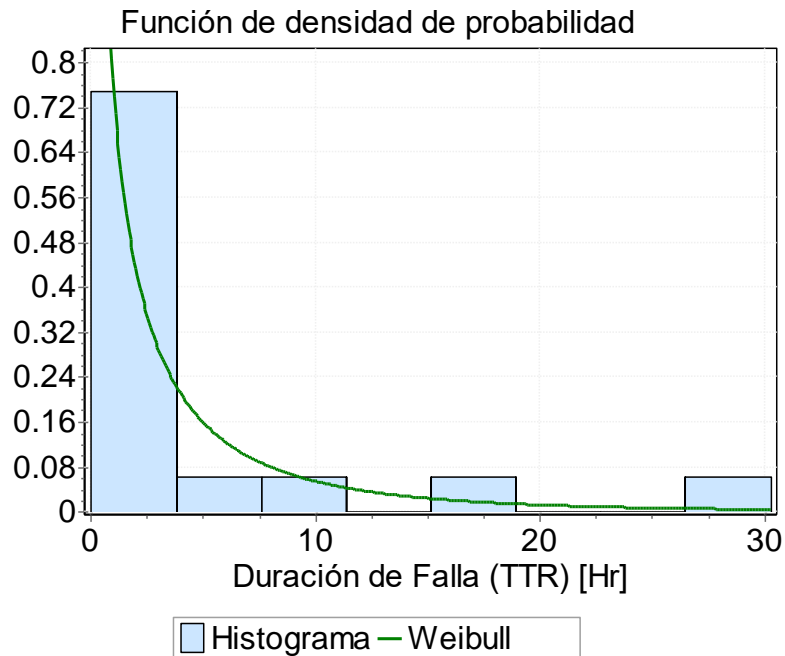


Gráfico 50: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 01

Tabla 42: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 01

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 5 | 0.144 | 1.145476226 | 0.95 |

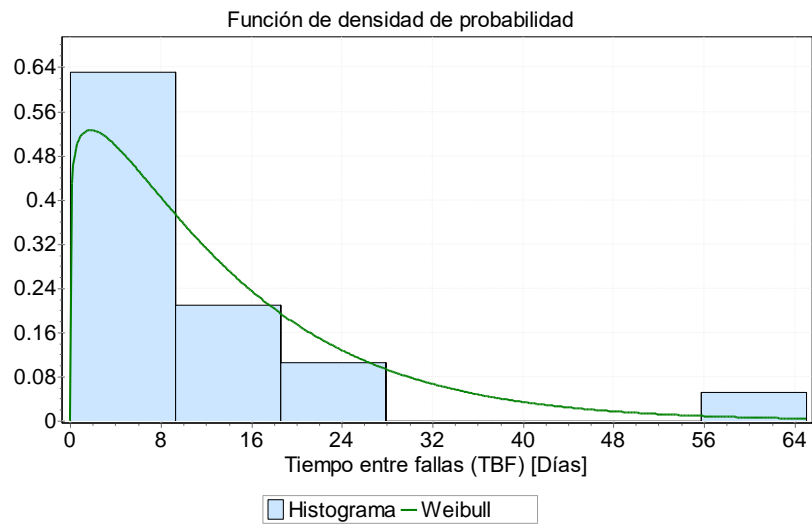


Gráfico 51: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 01

Tabla 43: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF - 01

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 4 | 1.557 | 1.481009432 | 0.83 |

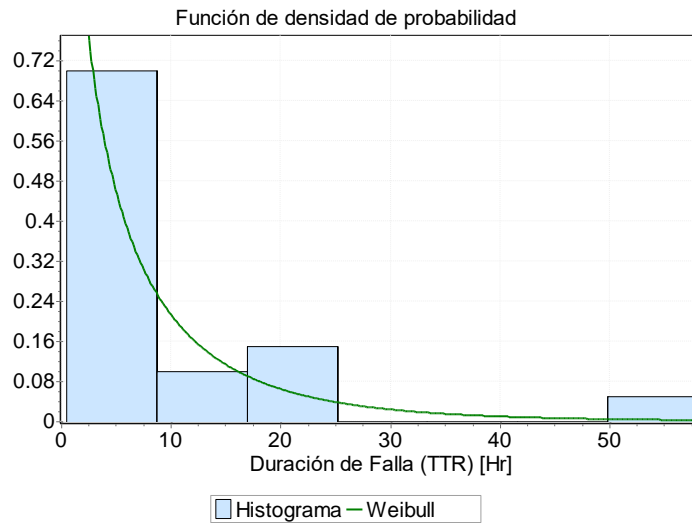


Gráfico 52: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 02

Tabla 44: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 02

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 4 | 0.225 | 0.297 | 0.99 |

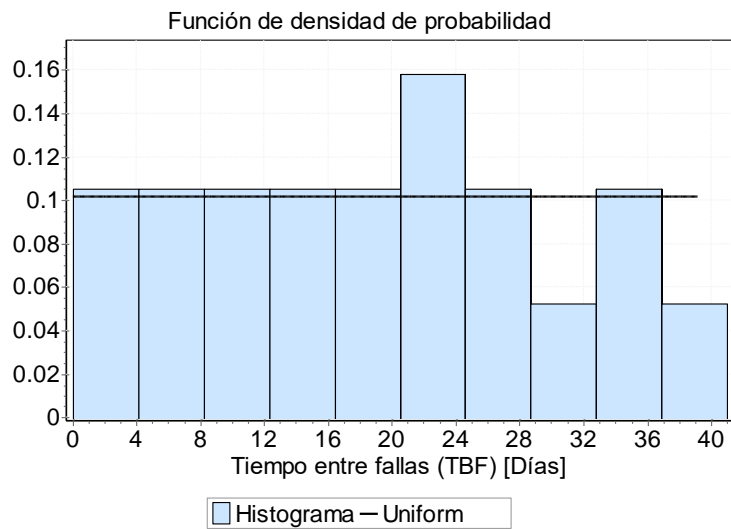


Gráfico 53 Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 02

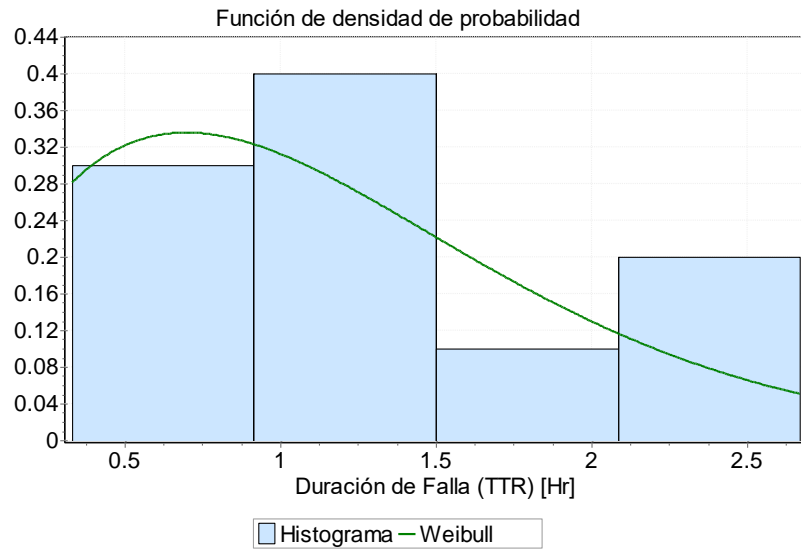


Gráfico 54: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 04

Tabla 45: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 04

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 1 | 0.0339 | 0.035765779 | 0.85 |

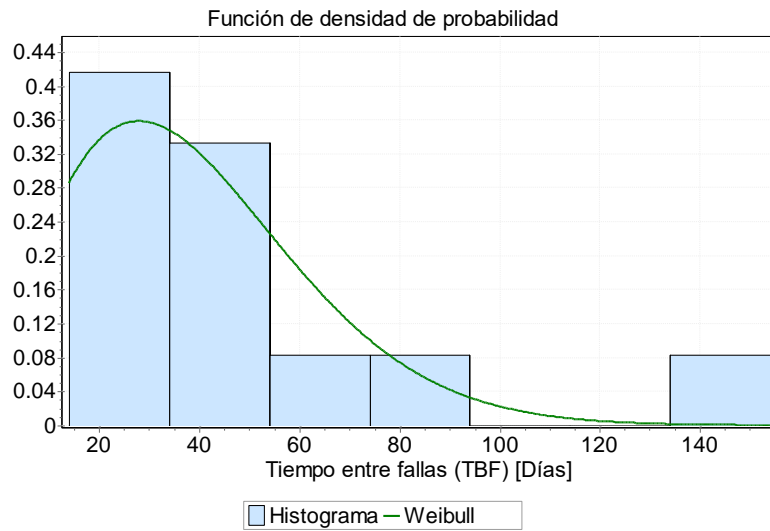


Gráfico 55: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF - 04

Tabla 46: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF - 04

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 4 | 0.1745 | 0.710723021 | 0.95 |

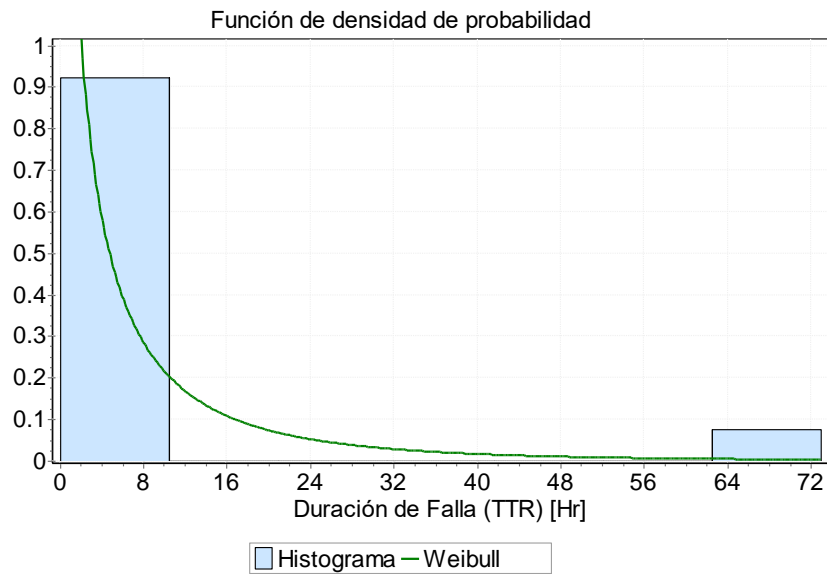


Gráfico 56: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –01

Tabla 47: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –01

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 4 | 0.7247 | 0.788372963 | 0.94 |

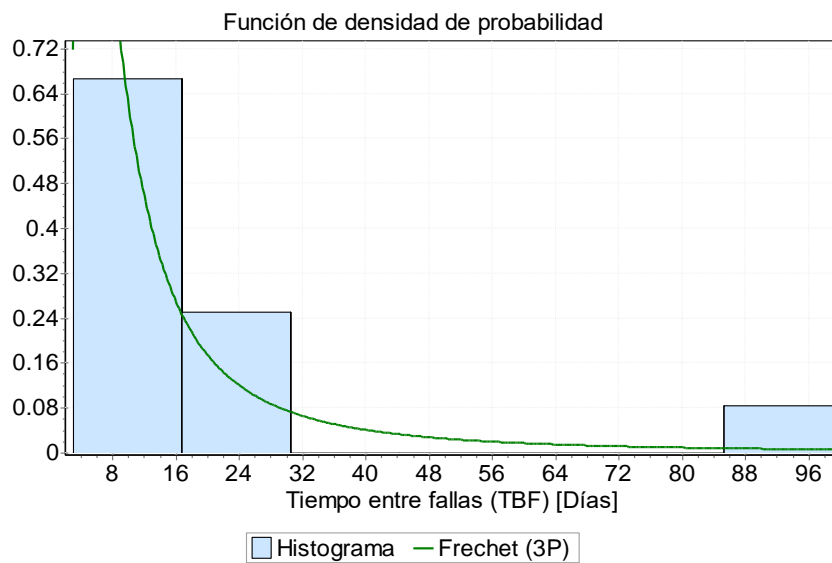


Gráfico 57: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –01

Tabla 48: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –01

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|-------------|--------------------|
| 4 | 0.0294 | 0.297109481 | 0.99 |

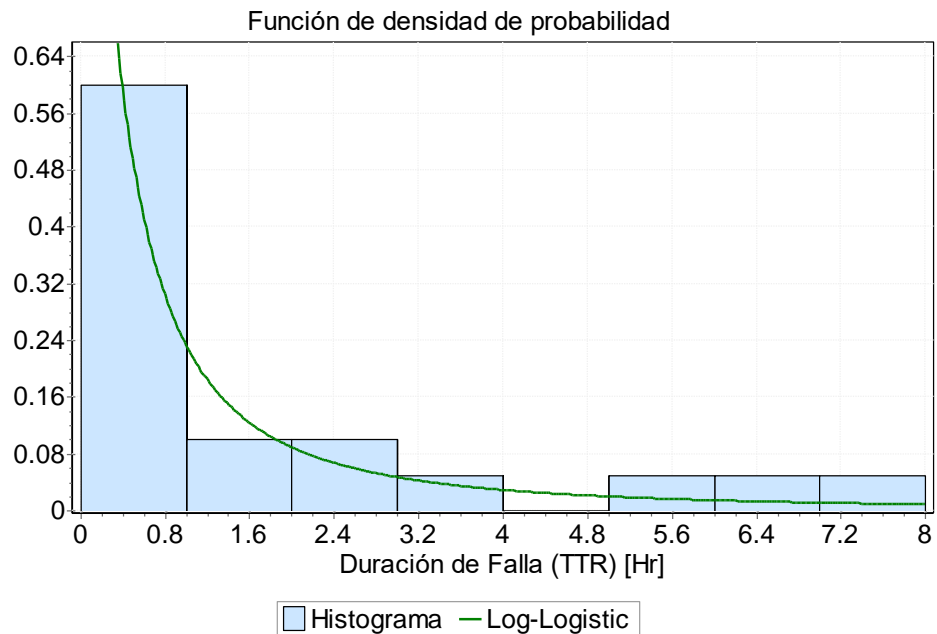


Gráfico 58: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –11

Tabla 49: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –11

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 5 | 1.665 | 1.691 | 0.89 |

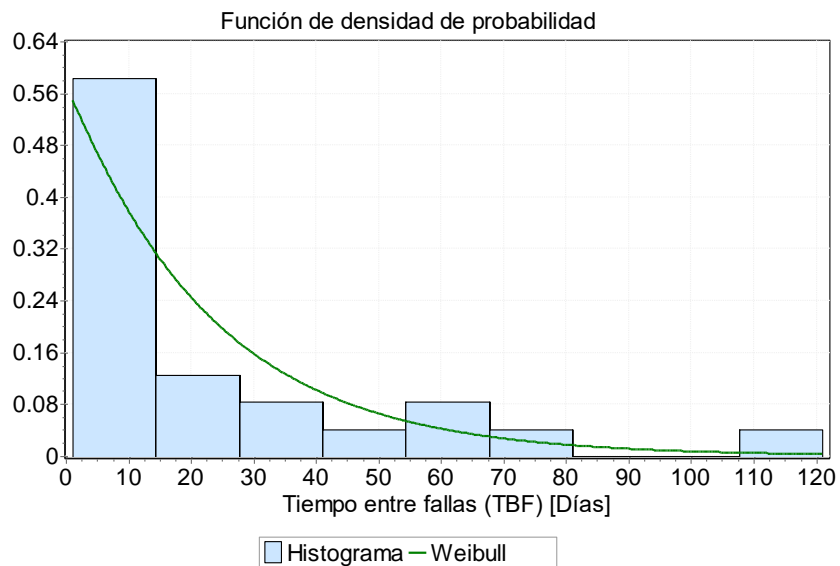


Gráfico 59: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –11

Tabla 50: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –11

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 6 | 0.237 | 0.872 | 0.99 |

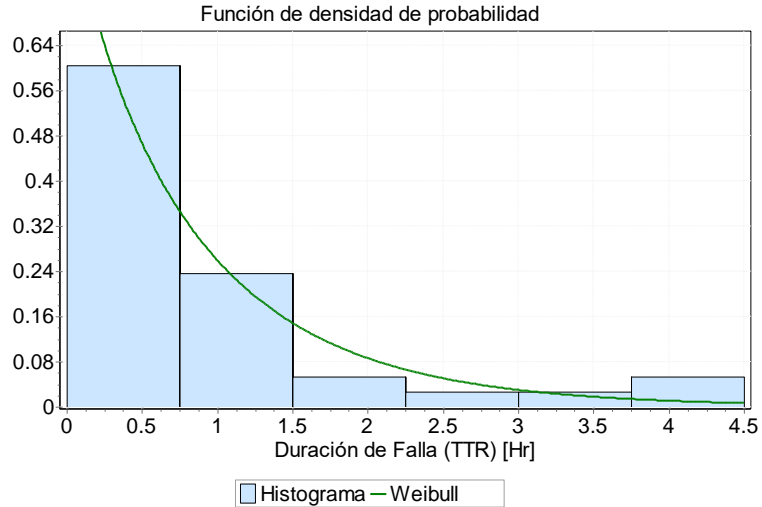


Gráfico 60: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV –21

Tabla 51: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV –21

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 3 | 1.930 | 1.964 | 0.58 |

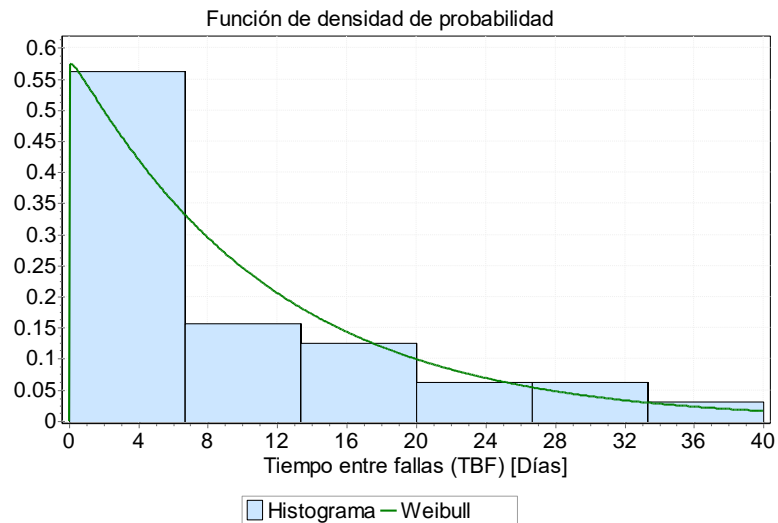


Gráfico 61: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV –21

Tabla 52: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV –21

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 5 | 2.412 | 2.675 | 0.75 |

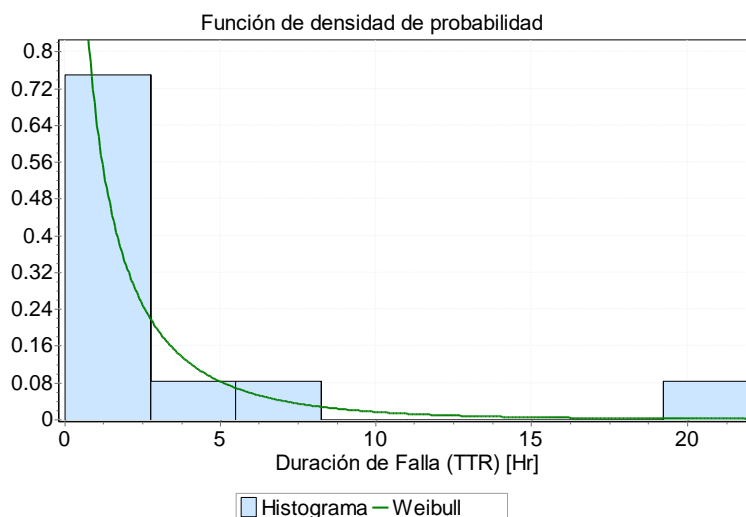


Gráfico 62: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correas CV – 31 y CV - 32

Tabla 53: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correas CV – 31 y CV - 32

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 5 | 0.028 | 0.554 | 0.99 |

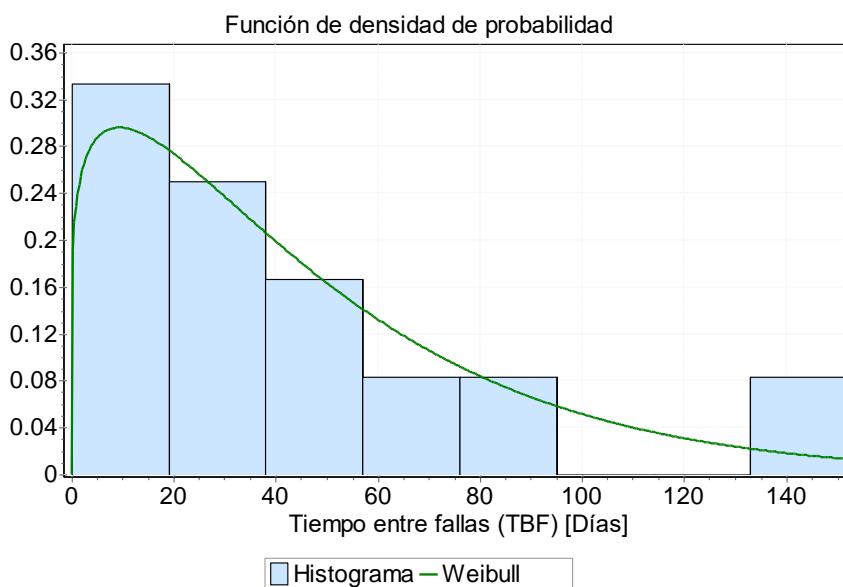


Gráfico 63: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correas CV – 31 y CV - 32

Tabla 54: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correas CV – 31 y CV - 32

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 5 | 0.068 | 0.554 | 0.99 |

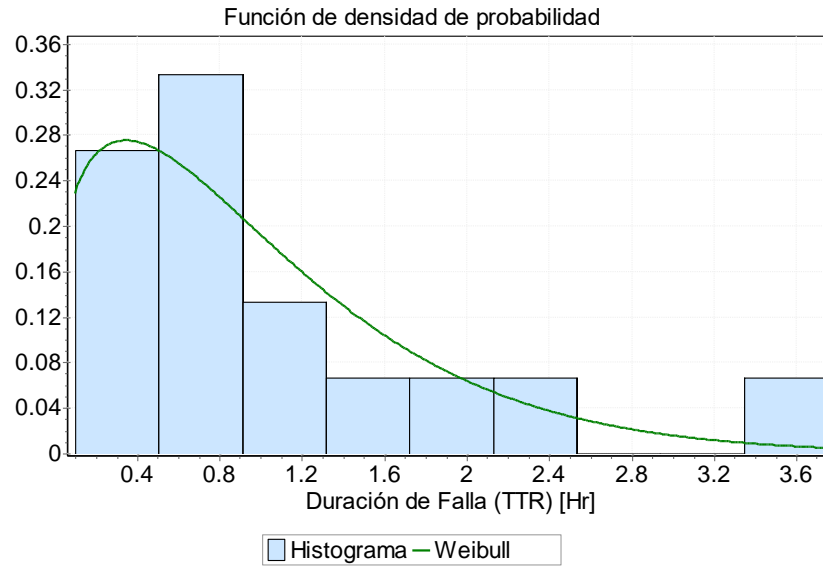


Gráfico 64: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa CV – 41

Tabla 55: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa CV – 41

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 6 | 0.396 | 1.635 | 0.95 |

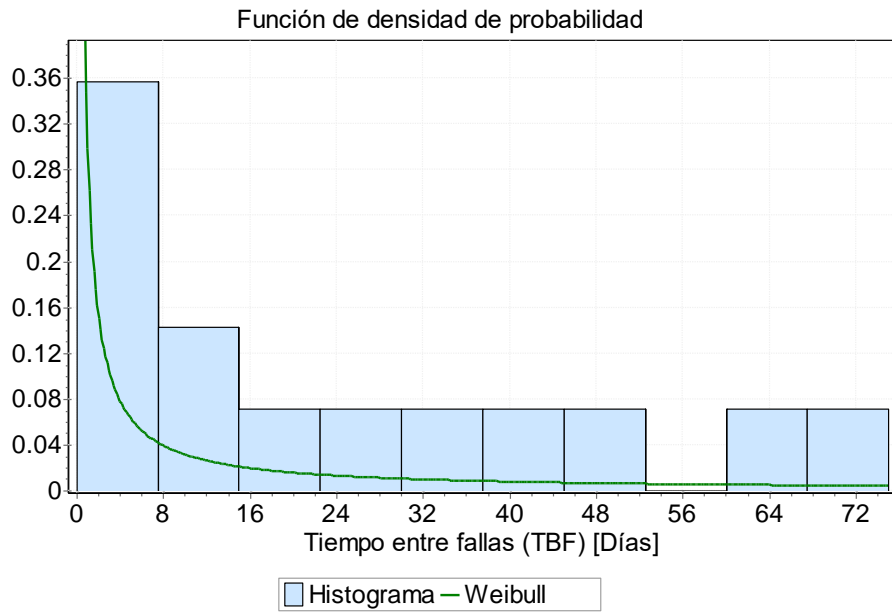


Gráfico 65: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa CV – 41

Tabla 56: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa CV – 41

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 7 | 2.528 | 2.833 | 0.9 |

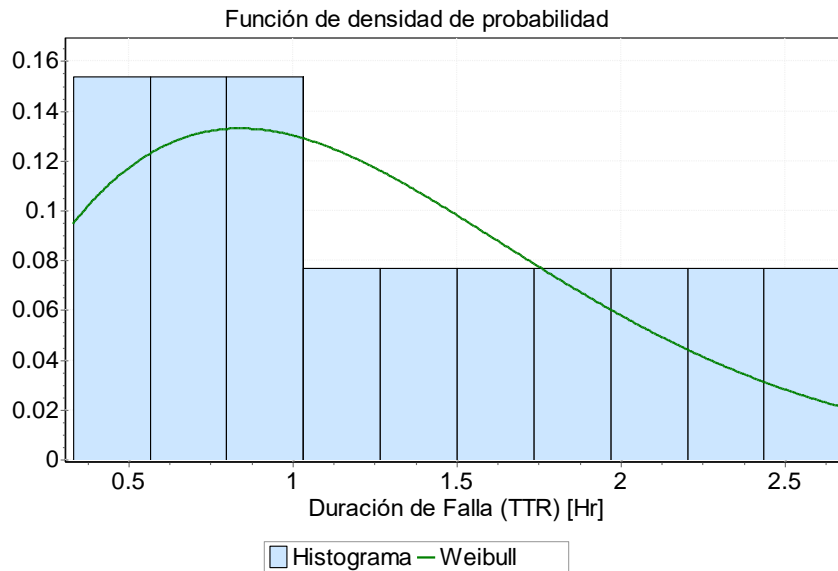


Gráfico 66: Densidad de probabilidad de la duración de falla de Correa BF - 04

Tabla 57: Resultados test Chi - cuadrado para duración de falla de Correa BF - 04

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 7 | 0.568 | 2.167 | 0.95 |

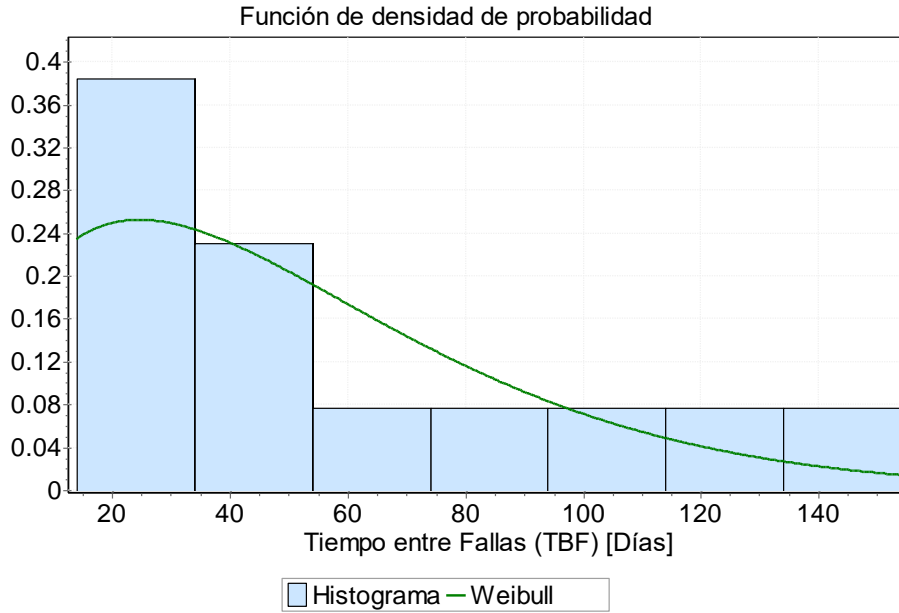


Gráfico 67: Densidad de probabilidad del tiempo entre fallas de Correa BF04

Tabla 58: Resultados test Chi - Cuadrado para el tiempo entre fallas de Correa BF04

| Grados de Libertad | Xi Real | Xi Teórico | Nivel de confianza |
|--------------------|---------|------------|--------------------|
| 4 | 0.874 | 1.064 | 0.9 |

9.2. ANEXO B

A continuación, se muestran los datos que se utilizaran para validar el modelo respecto a la producción de los meses de marzo, junio y noviembre del año 2015.

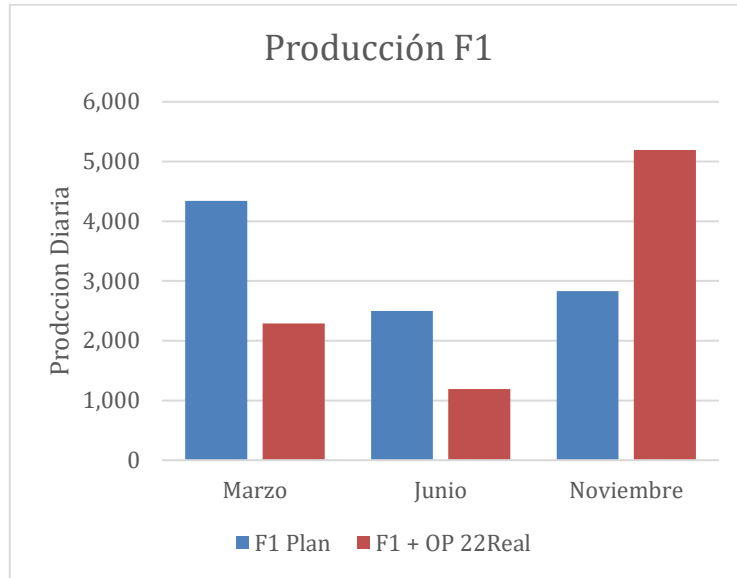


Gráfico 68: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 1

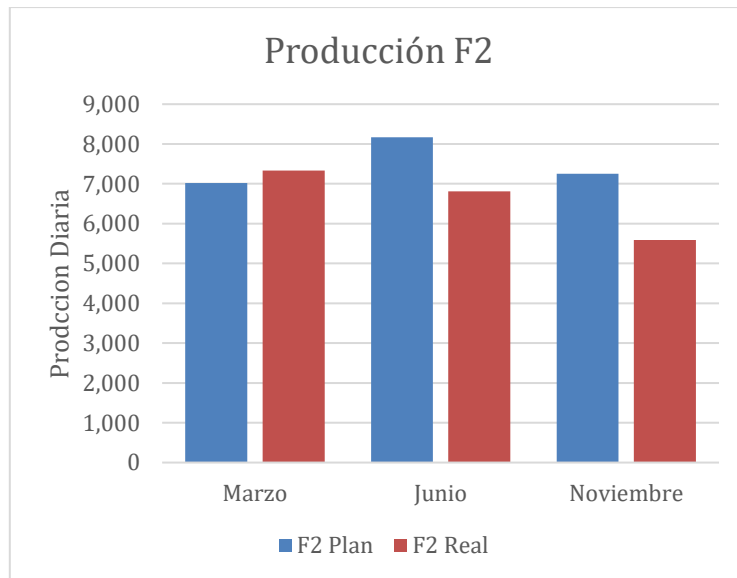


Gráfico 69: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 2

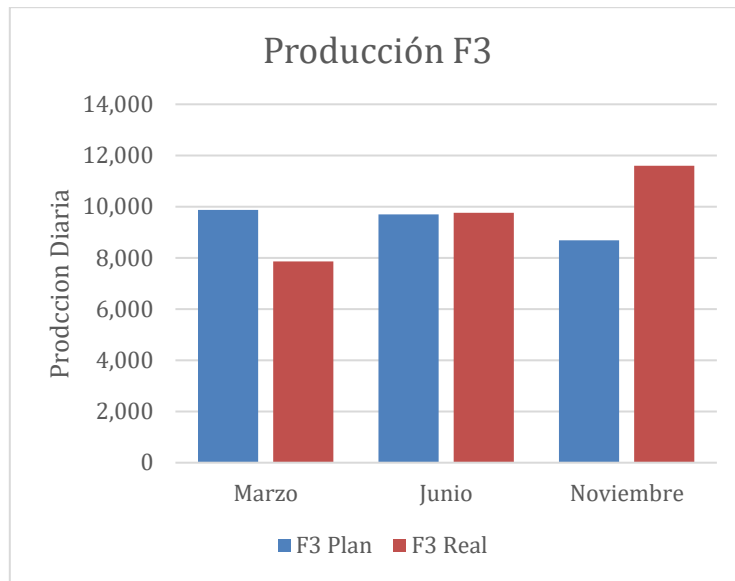


Gráfico 70: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 3

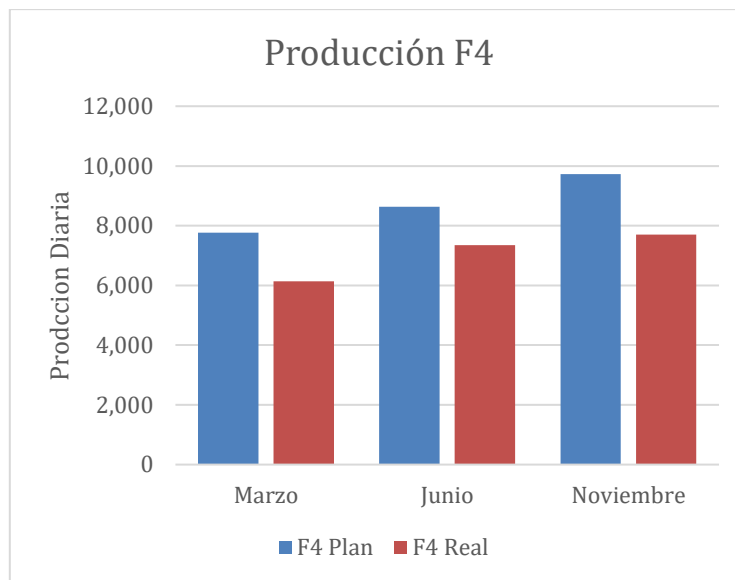


Gráfico 71: Producción mensual planificada y real del año 2015 en Fase 4

9.3. ANEXO C

En la presente sección se presentan los tiempos de distintos equipos en las simulaciones realizadas que, si bien no se utilizaron para calibrar el modelo, pero aun así verifican que las distintas partes del modelo están funcionando de manera correcta.

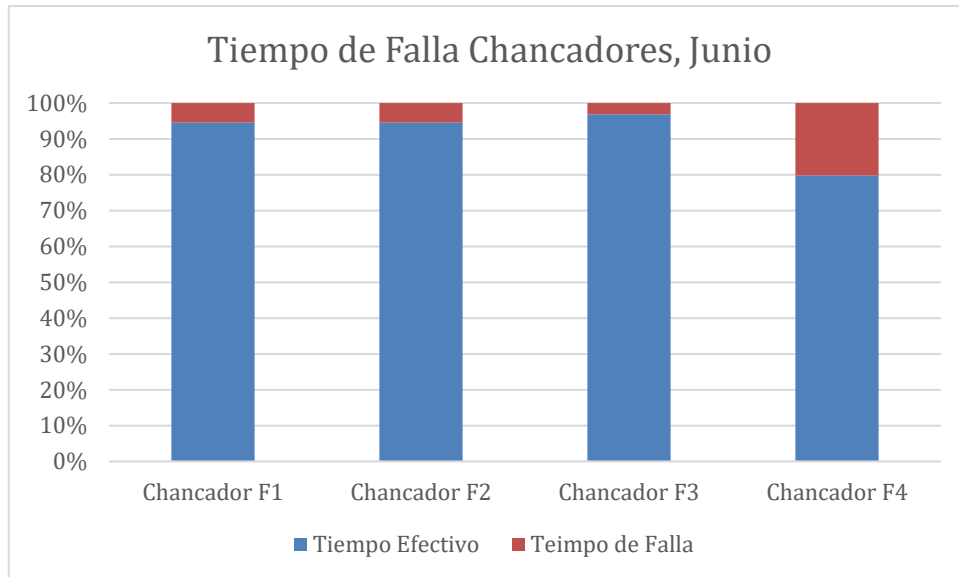


Gráfico 72: Distribución tiempos de chancadores, mes de junio

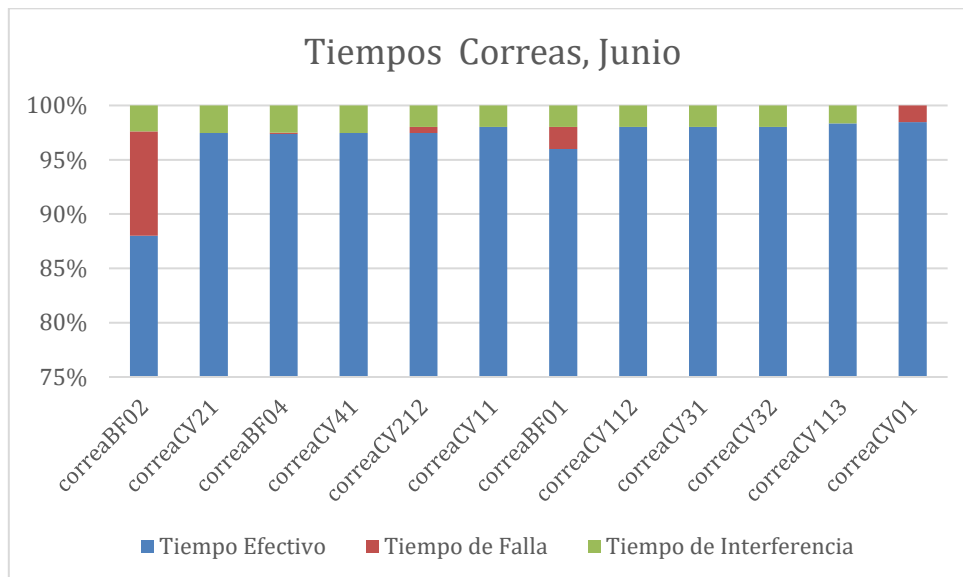


Gráfico 73: Tiempos correas mes de junio

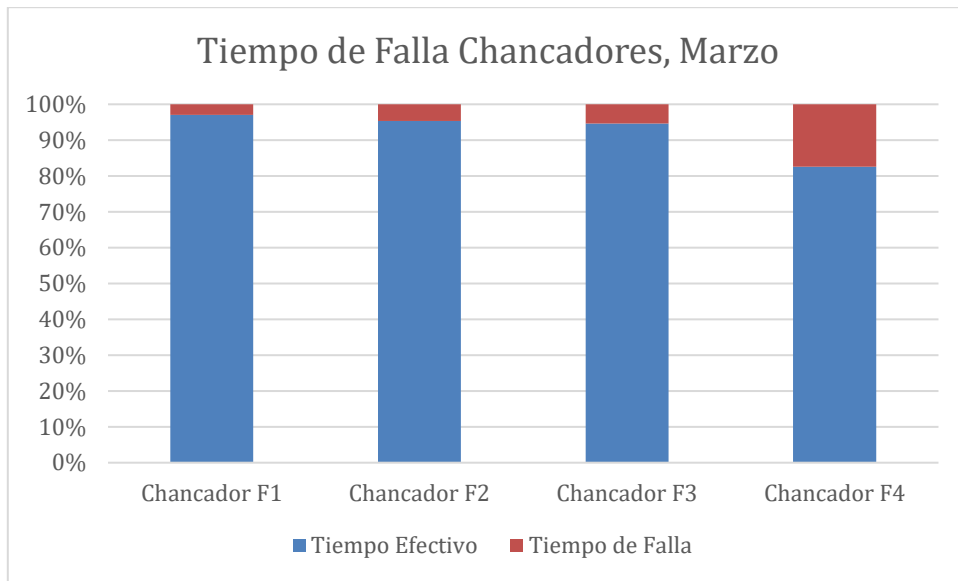


Gráfico 74: Distribución de tiempos chancadores mes de marzo

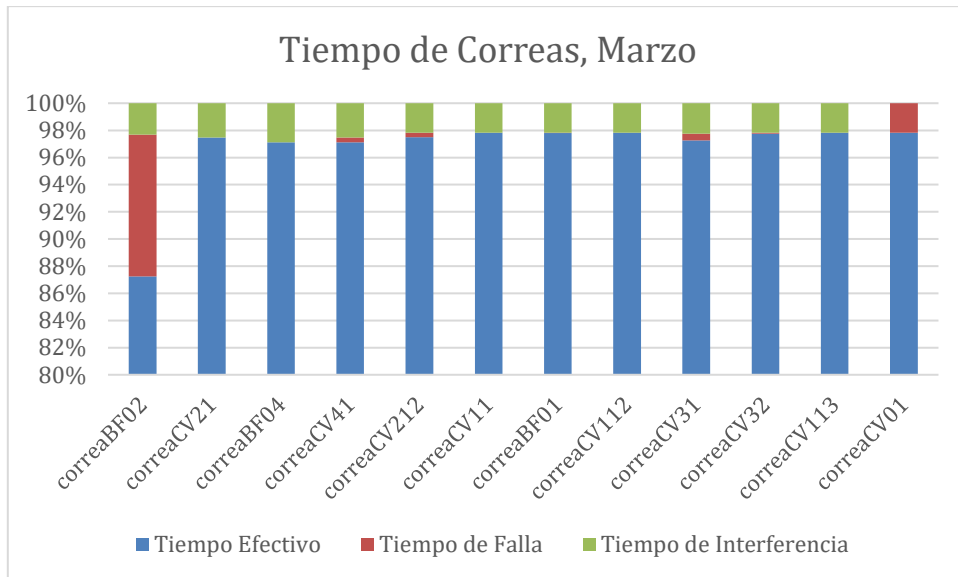


Gráfico 75: Tiempos correas mes de marzo