



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

PRODUCTIVIDAD DETERMINADA POR SIMULACIONES DE UN SISTEMA MINERO  
SUBTERRANEO AGREGADO POR NIVELES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

RACHID MANZUR ANDREU

PROFESOR GUÍA:  
WINSTON ROCHER ANDA

MIEMBROS DE LACOMISIÓN:  
MANUEL REYES JARA  
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS

SANTIAGO DE CHILE  
2015

## RESUMEN

Muchos de los grandes desafíos de los megaproyectos mineros subterráneos hoy en día, yacen en la confiabilidad del sistema minero, entendida como la probabilidad de que éste opere para producir una determinada cantidad de mineral. Esta confiabilidad se ve afectada por la coordinación e interacción que existe entre distintos niveles mineros, como producción, acarreo intermedio y transporte principal. En la operación, esto implica realizar diariamente una coordinación entre los distintos niveles, sin embargo, eventualidades ocurren en el turno a turno, impactando en la planificación minera. Debido a esto, es fundamental la integración de la incertidumbre en los modelos de planificación.

La simulación es una herramienta que permite desarrollar un modelo abstracto, que representa un sistema minero real, permitiéndonos evaluar el comportamiento de éste bajo distintos escenarios y condiciones. Las ventajas de la simulación radican en disminuir los costos y riesgos que la experimentación en minería en circunstancias reales tendría.

El presente se realiza la simulación de la operación de un sistema minero, de una mina subterránea que opera en la actualidad, explotada por el método de Block/Panel Caving, considerando los diseños, equipos, infraestructura y parámetros operacionales propios de ésta. Se determina su producción, el comportamiento de sus componentes y el impacto en la planificación, considerando la incertidumbre operacional.

Se realiza el experimento de simulación para un caso base el cual considera las condiciones operacionales actuales de la mina y cinco casos de estudio, en los cuales se intervinieron parámetros de la operación (tiempo de falla de los equipos y número de equipos).

En los resultados del caso base se aprecia que la producción promedio fue de 29.302 toneladas por día, un 25% menor que la indicada por el plan minero (39.000 toneladas). Se observa además que los piques de traspaso pasaban, en promedio, un 25% del tiempo lleno.

Luego de realizar los experimentos para los distintos casos de estudio, se determina que en el mejor de los casos se obtuvo una producción promedio de 33.600 toneladas por día, lo que constituye un 13% más respecto al caso base. Además, en los resultados se observa que los piques de traspaso sólo se encuentran en promedio un 7% del tiempo lleno, es decir 18% menos tiempo con respecto al caso base.

Los resultados muestran 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.

## **ABSTRACT**

Many of the great challenges of underground mining lies in the worthy of the mining system in achieving productive goals. This confidence is affected by the relations between different mining levels, like production, intermediate carry and main transport. In the operation, this means everyday coordination between this different levels, although the unforeseen and failures many times can not be planned correctly in the day, having a bad effect in the agenda. Because of this, it is fundamental to include this unexpected issues.

The simulation is a tool that allows developing an abstract model that recreates a real mining system, letting us evaluate the behavior of this model under different scenarios and conditions. The advantages of simulation lies in lowing the costs and risks that mining experimentation in real circumstances would have.

This work consists in the construction of a computational model representing the current mining system in an operating underground mine currently operated by the method of Block / Panel Caving, considering the designs, equipment, infrastructure and operational parameters of this own. Production, behavior of its components and the impact on planning was determined, considering the operational uncertainty.

The simulation experiment was performed to a base case which considers the current operating conditions of the mine and five case studies in which operating parameters (time to failure of equipment and number of machinery) are involved.

In the base case results, it was observed that the production was 29,302 tonnes per day, 25% less than that indicated by the mining plan (39,000 tons). It was further observed that the ore passes spent 25% of full time and that the average utilization for LHD equipment was 58%, 75% for trucks and 65% for trains.

After performing the experiments for the case studies, it was observed that the best result was obtained for the case to consider adding an extra truck to the system, whereby a production of 33,600 tonnes per day was obtained, which is a 13 % over the base case. Furthermore, the results shows that the ore passes are only 7% of the time occupied in its entirety, that is 18% less time compared to the base case. Finally, the use of equipment LHD averaged 67%, 9% greater than for the base case; the same goes for trains, whose use was 74%, 9% more than for the base case. This, together with the results of other studies, revealed a bottleneck in the system from the intermediate level of transport.

Finally, a search of the configuration of the mining system that would meet the production goal dictated by planning was made, finding that it is achieved by reducing the time of failure of the LHD and truck equipment by 25%, in addition to adding two trucks in the intermediate transport level.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera partir agradeciendo a mi profesor guía Winston Rocher y co-guía Manuel Reyes, sin ellos no hubiera sido posible realizar este trabajo, muchas gracias por su confianza, buena disposición y ganas de enseñar. También agradecer a todos los profesores que contribuyeron a mi formación académica.

Agradecer a Dios, a mi mamá por todo su apoyo aun en los peores momentos, a mi hermana Stephanie por su confianza, a mi abuelita por todas las veces que rezo cuando yo tenía prueba, a mi primo Sebastián y mi prima Nicole por ayudarme a salir del stress. También a mis compañeros de carrera y amigos de la universidad, en especial a mi compañera Selene que me apoyó hasta las últimas instancias.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	3
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo General.....	3
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.3.	Alcances.....	4
1.4.	Metodología.....	5
2.	Antecedentes.....	7
2.1.	Marco teórico.....	7
2.1.1.	El método de explotación.....	7
2.1.2.	Block/Panel Caving.....	7
2.1.3.	Mina subterránea agregada por niveles.....	7
2.1.4.	Nivel de hundimiento (NH).....	8
2.1.5.	Nivel de producción (NP).....	8
2.1.5.1.	Punto de extracción.....	9
2.1.5.2.	Punto de vaciado.....	10
2.1.5.2.1.	Parrilla y martillo picador.....	10
2.1.5.2.2.	Buzón.....	10
2.1.5.2.3.	Capacidad de carga viva.....	11
2.1.5.2.4.	Tiempo por pique lleno.....	11
2.1.6.	Nivel de transporte intermedio (NTI).....	11
2.1.7.	Nivel de transporte principal (NTP).....	11
2.1.8.	Interferencias operacionales.....	11
2.1.8.1.	Puntos de extracción.....	12
2.1.8.2.	Piques de traspaso.....	13
2.1.8.3.	Fallas en equipos mineros.....	15
2.1.9.	Equipos mineros.....	15
2.1.9.1.	LHD.....	15
2.1.9.2.	Camiones.....	17
2.1.9.3.	Trenes.....	18
2.1.10.	Tiempo de ciclo.....	19
2.1.11.	ASARCO.....	19
2.1.11.1.	Disponibilidad y utilización de los equipos.....	20
2.1.12.	Tasa de extracción.....	20

2.1.13.	Simulación de procesos .....	21
2.1.13.1.	Simulación de evento discreto (SED) .....	21
2.1.14.	Sistema minero .....	22
2.1.14.1.	Productividad .....	22
2.1.14.2.	Plan de producción minero.....	22
2.1.14.3.	Confiabilidad.....	22
2.2.	Recopilación Bibliográfica .....	22
2.2.1.	Evolución de la simulación de sistemas mineros en Europa .....	22
2.2.2.	Dimensionamiento de sistema de manejo de materiales .....	23
2.2.3.	Impacto en la productividad del nivel de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción .....	25
2.2.4.	Conclusión.....	27
2.3.	Caso de estudio .....	28
2.3.1.	Método de explotación .....	28
2.3.1.1.	Nivel de producción.....	28
2.3.1.2.	Nivel de transporte intermedio .....	29
2.3.1.3.	Nivel de transporte principal.....	30
2.3.2.	Equipos .....	30
2.3.2.1.	LHD .....	30
2.3.2.2.	Camión.....	31
2.3.2.3.	Tren.....	32
2.3.3.	Sistema de turnos.....	32
2.3.4.	Tasa de extracción .....	33
3.	Desarrollo .....	34
3.1.	Desarrollo del modelo conceptual .....	35
3.1.1.	Límite de batería.....	35
3.1.2.	Elementos principales.....	35
3.1.2.1.	Entidades.....	35
3.1.2.2.	Locaciones .....	36
3.1.2.3.	Recursos.....	37
3.1.3.	Criterios físicos.....	38
3.1.4.	Criterios de decisión .....	38
3.1.5.	Criterios de operación.....	39
3.1.6.	Parámetros de entrada.....	39
3.1.7.	Variables de salida.....	40

3.2.	Implementación del modelo de simulación .....	40
3.2.1.	Implementación de los procesos.....	40
3.2.1.1.	Cambio de día .....	40
3.2.1.2.	Carguío en los puntos de extracción.....	41
3.2.1.3.	Transporte del mineral mediante LHD .....	42
3.2.1.4.	Mantenición, falla y cambio de turno para el LHD .....	42
3.2.1.5.	Viaje y tiempo de ciclo de los LHD .....	43
3.2.1.6.	Pique de traspaso desde nivel de producción al nivel de transporte intermedio..	43
3.2.1.7.	Viaje y tiempo de ciclo de los camiones.....	44
3.2.1.8.	Mantenición y falla de camiones .....	44
3.2.1.9.	Cambio de turno para los camiones .....	45
3.2.1.10.	Piques principales.....	46
3.2.1.11.	Piques que conectan el nivel de producción con nivel de transporte principal	46
3.2.1.12.	Viaje y tiempo de ciclo de los trenes.....	46
3.2.1.13.	Funcionamiento de mantenciones para el tren .....	47
3.2.2.	Modelos .....	47
3.2.2.1.	Modelo A .....	48
3.2.2.2.	Modelo B .....	49
3.2.2.3.	Modelo C .....	50
3.2.2.4.	Modelo D .....	51
3.2.3.	Verificación .....	52
3.2.3.1.	Horas agendadas para cada equipo .....	52
3.2.3.2.	Contador de entidades auxiliares .....	52
3.2.3.3.	Tiempo en operación .....	53
3.2.4.	Validación.....	54
4.	Resultados y análisis.....	55
4.1.	Caso Base.....	55
4.1.1.	Resultados.....	55
4.1.2.	Análisis .....	59
4.2.	Caso de estudio A: Equipos LHD con un 25% menos de tiempo de fallas. ....	60
4.2.1.	Resultados.....	60
4.2.2.	Análisis .....	64
4.3.	Casos de estudio B: Equipos camión con un 50% menos de tiempo de fallas. ....	65
4.3.1.	Resultados.....	65
4.3.2.	Análisis .....	69

4.4.	Caso de estudio C: Equipos camión con un 50% menos de tiempo de fallas y LHD con 25% menos de tiempo de fallas.....	70
4.4.1.	Resultados.....	70
4.4.2.	Análisis .....	74
4.5.	Casos de estudio D: Agregar un camión más al caso base .....	75
4.5.1.	Resultados.....	75
4.5.2.	Análisis .....	78
4.6.	Caso de estudio E: Agregar un tren más al caso base.....	79
4.6.1.	Resultados.....	79
4.6.2.	Análisis .....	83
4.7.	Propuesta para cumplir el plan minero .....	84
4.7.1.	Sistema con 6 camiones.....	84
4.7.2.	Sistema con 5 camiones y tres trenes. ....	84
4.7.3.	Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y 3 trenes... 84	
4.7.1.	Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y LHD y 3 trenes. 84	
4.7.2.	Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y LHD y 2 trenes. 85	
4.8.	Discusión final .....	86
5.	Conclusiones .....	87
6.	Recomendaciones .....	89
7.	Bibliografía.....	90
8.	ANEXO A: Detalle de los tiempos de los equipos del caso base .....	91



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Interferencias operacionales asociadas a los puntos de extracción .....	12
Tabla 2: Comparación entre LHD diesel y eléctrico .....	17
Tabla 3: Disponibilidades y utilizaciones de equipos .....	20
Tabla 4: Parámetros de diseño del sistema de manejo de materiales .....	24
Tabla 5: Parámetros de diseño de equipos utilizados en el manejo de materiales de la mina en estudio.....	24
Tabla 6: Parámetros de diseño de los equipos luego de la simulación.....	25
Tabla 7: Características nivel de transporte intermedio .....	28
Tabla 8: Características de los piques de traspaso del nivel de producción .....	28
Tabla 9: Piques del nivel de producción.....	29
Tabla 10: Características del nivel de transporte intermedio .....	29
Tabla 11: Piques del nivel de transporte intermedio .....	30
Tabla 12: Ubicación piques del nivel de transporte principal .....	30
Tabla 13: Cantidad de equipos de la faena en estudio.....	30
Tabla 14: Características de los LHD.....	31
Tabla 15: Características de los camiones.....	31
Tabla 16: Características de los trenes .....	32
Tabla 17: Sistema de turnos de la faena en estudio.....	32
Tabla 18: Pérdida de tiempo operacional debido a los cambios de turno .....	32
Tabla 19: Límite de producción diaria por calle de la faena en estudio .....	33
Tabla 20: Capacidades de las locaciones calle en el modelo de simulación. ....	37
Tabla 21: Capacidad de los piques en el modelo de simulación. ....	37
Tabla 22: Capacidad de los piques principales en el modelo de simulación.....	37
Tabla 23: Horas agendadas para cada equipo del modelo.....	52
Tabla 24: Salida de entidades auxiliares del modelo.....	53
Tabla 25: Tiempo promedio de operación de entidades auxiliares. ....	53
Tabla 26: Disponibilidades y utilización para los equipos del modelo. ....	54
Tabla 27: Cantidad de equipos caso base .....	55
Tabla 28: Tiempos de falla de equipos caso base.....	55
Tabla 29: Producción mensual y diaria del caso base .....	55
Tabla 30: Estadística de la producción diaria promedio caso base .....	56
Tabla 31: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso base .....	57
Tabla 32: Estado de los piques de traspaso caso base .....	58
Tabla 33: Estado de los piques de traspaso principales caso base.....	58
Tabla 34: Cantidad de equipos caso estudio A.....	60
Tabla 35: Tiempo de falla de equipos caso estudio A.....	60
Tabla 36: Producción mensual y diaria del caso estudio A.....	60
Tabla 37: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio A .....	61
Tabla 38: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio A .....	62
Tabla 39: Estado de los piques de traspaso caso estudio A.....	63
Tabla 40: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio A .....	63
Tabla 41: Cantidad de equipos caso estudio B .....	65
Tabla 42: Tiempo de falla de equipos caso estudio B .....	65
Tabla 43: Producción mensual y diaria del caso estudio B .....	65
Tabla 44: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio B .....	66
Tabla 45: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio B .....	67

Tabla 46: Estado de los piques de traspaso caso estudio B .....	68
Tabla 47: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio B .....	68
Tabla 48: Cantidad de equipos caso estudio C .....	70
Tabla 49: Tiempo de falla de equipos caso estudio C .....	70
Tabla 50: Producción mensual y diaria del caso estudio C .....	70
Tabla 51: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio C .....	71
Tabla 52: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio C .....	72
Tabla 53: Estado de los piques de traspaso caso estudio C .....	73
Tabla 54: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio C .....	73
Tabla 55: Cantidad de equipos caso estudio D.....	75
Tabla 56: Tiempo de falla de equipos caso estudio D.....	75
Tabla 57: Producción mensual y diaria del caso estudio D.....	75
Tabla 58: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio D.....	76
Tabla 59: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio D .....	77
Tabla 60: Estado de los piques de traspaso caso estudio D.....	78
Tabla 61: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio D .....	78
Tabla 62: Cantidad de equipos caso estudio E .....	79
Tabla 63: Tiempo de falla de equipos caso estudio E .....	79
Tabla 64: Producción mensual y diaria del caso estudio E .....	79
Tabla 65: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio E .....	80
Tabla 66: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio E.....	81
Tabla 67: Estado de los piques de traspaso caso estudio E .....	82
Tabla 68: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio E.....	83
Tabla 69: Detalle de tiempos LHD 6.....	91
Tabla 70: Detalle de tiempos LHD 7 .....	91
Tabla 71: Detalle de tiempos LHD 8.....	91
Tabla 72: Detalle de tiempos LHD 9.....	92
Tabla 73: Detalle de tiempos LHD 10.....	92
Tabla 74: Detalle de tiempos LHD 11 .....	92
Tabla 75: Detalle de tiempos LHD 12.....	92
Tabla 76: Detalle de tiempos LHD 13.....	93
Tabla 77: Detalle de tiempos LHD 14.....	93
Tabla 78: Detalle de tiempos LHD 15.....	93
Tabla 79: Detalle de tiempos LHD 16.....	93
Tabla 80: Detalle de tiempos LHD 17 .....	94
Tabla 81: Detalle de tiempos LHD 18.....	94
Tabla 82: Detalle de tiempos LHD 19.....	94
Tabla 83: Detalle de tiempos LHD 20.....	94
Tabla 84: Detalle de tiempos LHD 784.....	95
Tabla 85: Detalle de tiempos camiones.....	95
Tabla 86: Detalle de tiempos trenes .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de método Block/Panel Caving .....	2
Figura 2: Esquema de un sistema minero agregado por niveles .....	8
Figura 3: Esquema del nivel de producción .....	9
Figura 4: Esquema punto de extracción .....	9
Figura 5: Esquema del punto de descarga con parrilla.....	10
Figura 6: Esquema de pique de traspaso con buzón de carguío. ....	11
Figura 7: Esquema de colgaduras en los puntos de extracción .....	13
Figura 8: Esquema de colgadura de un pique.....	14
Figura 9: Interferencias operacionales en el pique de traspaso .....	14
Figura 10: Equipo LHD .....	16
Figura 11: Camión de carretera .....	18
Figura 12: Camión minero subterráneo .....	18
Figura 13: Definición gráfica de tiempos según norma ASARCO .....	19
Figura 14: Flowsheet del sistema de manejo de materiales de la mina a rajo abierto en estudio. ....	24
Figura 15: Mineral presente en la tolva de chancado durante el periodo de simulación.....	25
Figura 16: Tonelaje extraído vs tonelaje planificado de DOZ .....	26
Figura 17: Diagrama del sistema simulado de DOZ .....	26
Figura 18: Tonelaje producido en función de frecuencia de eventos en calle y pique.....	27
Figura 19: Diagrama lógico para enviar el mineral a las locaciones calle. ....	41
Figura 20: Diagrama lógico para llamar al recurso LHD desde los puntos de vaciado. ....	42
Figura 21: Distribución de probabilidad de ocurrencia de falla para LHD. ....	43
Figura 22: Diagrama del nivel de producción. ....	43
Figura 23: Diagrama del nivel de producción y transporte intermedio.....	44
Figura 24: Diagrama de locaciones mantención y falla para el nivel de transporte intermedio....	45
Figura 25: Distribución de probabilidad de ocurrencia de falla para camiones. ....	45
Figura 26: Diagrama del nivel de transporte principal y transporte intermedio.....	47
Figura 27: Diagrama del modelo A. ....	48
Figura 28: Diagrama del modelo B. ....	49
Figura 29: Diagrama del modelo C. ....	50
Figura 30: Diagrama del modelo D. ....	51
Figura 31: Producción mensual caso base .....	56
Figura 32: Producción diaria caso base .....	57
Figura 33: Producción mensual caso estudio A.....	61
Figura 34: Producción diaria caso estudio A.....	62
Figura 35: Producción mensual caso estudio B.....	66
Figura 36: Producción diaria caso estudio B.....	67
Figura 37: Producción mensual caso estudio C.....	71
Figura 38: Producción diaria caso estudio C.....	72
Figura 39: Producción mensual caso estudio D.....	76
Figura 40: Producción diaria caso estudio D.....	76
Figura 41: Producción mensual caso estudio E.....	80
Figura 42: Producción diaria caso estudio E.....	81
Figura 43: Producción mensual caso que cumple el plan minero .....	85
Figura 44: Producción diaria caso que cumple el plan minero.....	85

## 1. INTRODUCCIÓN

La planificación minera es la actividad que define cuándo y cómo se extraerán los recursos económicos presentes en un yacimiento mineral. Su importancia es vital para el desarrollo de la actividad, debido a que permite enlazar los objetivos estratégicos de una compañía minera dada con los recursos. Una de las principales tareas de la planificación es generar el plan minero que define los tonelajes y las leyes respectivas a ser extraídas durante la vida de la mina, lo que se traduce finalmente en una cuantificación del potencial económico de un yacimiento dado en el tiempo. Es por esto, que en el proceso de planificación se está apostando no tan solo por un determinado comportamiento productivo a nivel mina, sino además se compromete el porvenir económico de la faena completa, tanto en sus labores de extracción como de beneficio. [1]

Muchos de los grandes desafíos de los megaproyectos mineros en la actualidad, yacen en la confiabilidad del sistema minero, entendida como la probabilidad de que éste opere para producir una determinada cantidad de mineral, para cumplir con las metas productivas, a fin de dar seguridad al plan minero obtenido luego del proceso de planificación. Este objetivo está directamente asociado a la integración de la incertidumbre relacionada a los componentes del modelo de planificación, incertidumbre entendida como la probabilidad de que estos componentes se comporten de la manera esperada. Principalmente existen tres fuentes de incertidumbre asociadas a los proyectos mineros: la variabilidad geológica, los modelos económicos y la operacional.

La incertidumbre operacional corresponde a los factores tanto externos como internos, que pudiesen afectar el desarrollo que se tiene planificado para las operaciones unitarias, que se llevan a cabo en los distintos sistemas de extracción de minerales. Estas fuentes de mal funcionamiento o funcionamiento que se aleja de lo visualizado en el proceso de planificación, están directamente ligadas al sistema minero en particular que se utiliza. Es decir en una mina a cielo abierto, podemos encontrar factores que pudiesen interferir con el proceso productivo distintos a los que se encuentran en minería subterránea, a su vez dentro de la minería subterránea cada método de explotación tiene distintos generadores de esta incertidumbre.

El método de explotación Block/Panel Caving utilizado en minería subterránea, tiene la particularidad de estar compuesto por distintos niveles operacionales, que se encuentran en distintas cotas, uno encima del otro, tal como se aprecia en la figura 1.

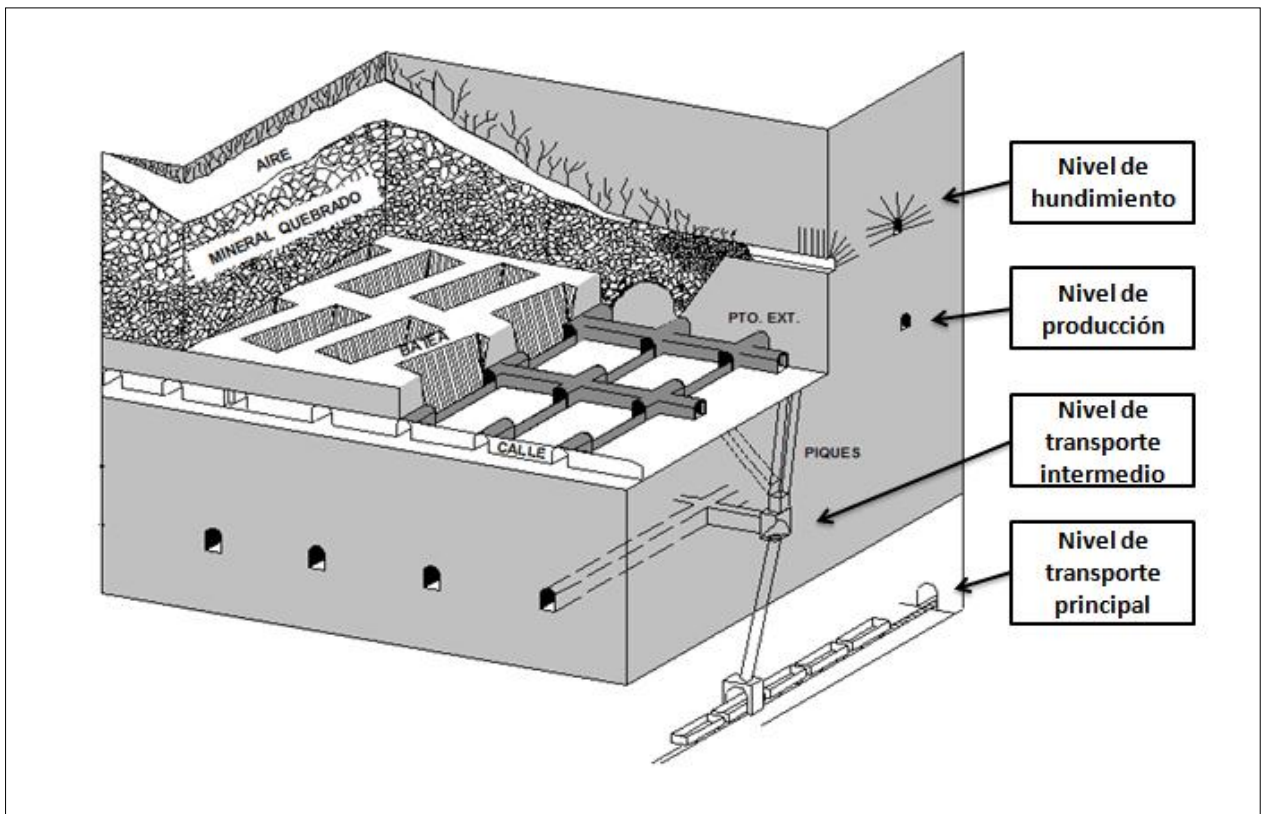


Figura 1: Esquema de método Block/Panel Caving.

En estos niveles operan distintos equipos que se encargan de la conducción del mineral desde los puntos de extracción, ubicados el nivel de producción, hasta el nivel de transporte principal pasando por un nivel de transporte intermedio, esto se logra mediante el uso de excavaciones verticales llamadas piques de traspaso, las que conectan los distintos niveles. Al ser un sistema minero agregado por niveles, la confiabilidad de éste se ve afectada por las coordinaciones e interacciones que existen entre los distintos niveles mineros, esto quiere decir que los eventos que ocurran en un nivel no solo afecta a éste, sino al sistema en su globalidad. En la operación esto implica realizar diariamente una coordinación entre los distintos niveles, sin embargo los imprevistos y fallas no siempre pueden ser visualizados correctamente en el turno a turno, impactando en la planificación minera.

Lo expresado anteriormente hace imprescindible mirar la planificación estos niveles desde un punto de vista que englobe a cada uno de ellos, y no de forma individual haciendo que cada nivel trabaje optimizando su propio proceso, ya que se debe considerar el impacto que tienen los niveles entre sí. Esta corrección a prueba y error no es eficiente pues lo ideal es que el sistema esté balanceado desde un principio. Por otra parte plantear este problema desde un principio no es una tarea menor pues en amplios proyectos, el problema es demasiado grande para entenderlo en su detalle.

Para poder resolver el problema detallado anteriormente es que se recurre a la simulación, esta herramienta nos permite desarrollar un modelo abstracto, que representa un sistema real, permitiéndonos evaluar el comportamiento de éste bajo distintos escenarios y condiciones. Es de gran utilidad en minería, ya que experimentar en minería puede ser muy costoso y arriesgado. Se

creará un modelo computacional que represente el sistema minero actual, de una gran faena minera subterránea explotada por el método de hundimiento Block/Panel Caving. Considerando los diseños, equipos, infraestructura y parámetros operacionales propios de ésta, para una zona en particular de la mina. Permittiéndonos determinar bajo distintos escenarios el impacto que se produce en la planificación minera, cuando se le inserta incertidumbre operacional, a un sistema minero exigido productivamente.

## **1.1. Motivación**

Aumentar la eficiencia de los sistemas mineros actuales, con miras hacia la optimización del proceso productivo, eliminando los tiempos muertos producto de las interferencias entre niveles y que no son gestionados, por ser vistas como una suerte de externalidades negativas de cada nivel. Aprovechando las ventajas que nos entregan los software dedicados a la simulación de procesos. Permittiéndonos hacer más rentable el negocio minero, administrando y dimensionando los recursos de manera más eficiente.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar la productividad de una mina explotada por block/panel caving agregada por niveles, mediante simulaciones que tomen en cuenta las interferencias operacionales causadas por el trabajo independiente entre cada uno de los niveles.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar eventos que generan interferencia operacional, para diferentes componentes del sistema minero subterráneo.
- Realizar análisis cualitativo y cuantitativo de las operaciones unitarias de carguío y transporte de mineral, que se llevan a cabo en una mina subterránea explotada por el método de Block/Panel Caving.
- Confeccionar e implementar un modelo conceptual del sistema minero en estudio en el software de simulación Promodel.
- Realizar la simulación del sistema minero y analizar los impactos en la productividad bajo distintos escenarios.

### 1.3. Alcances

- El trabajo se engloba en la minería subterránea, específicamente una mina explotada por el método de hundimiento Block/Panel Caving.
- Se emplaza dentro de los requerimientos y formas de trabajo similares a los de una mina en actual explotación.
- La determinación de vulnerabilidades y producciones vienen dadas por información de terreno de acuerdo a la experiencia de profesionales dedicados a la producción en minería subterránea.
- Se consideran los diseños del sistema minero establecidos sin posibilidad de variarlos durante el estudio.
- El sistema minero será tomado desde los puntos de extracción, hasta el vaciado a los piques que llegan al nivel de transporte principal, pasando por un nivel de transporte intermedio.
- Se realiza la corrida del modelo creado simulando un mes de producción.
- Los equipos que serán tomados en cuenta en la realización del modelo serán LHD, camiones y trenes.
- Las interferencias operacionales relevantes para este estudio serán las producidas por fallas y mantenencias en los equipos, cuellos de botella producidos por la operación y el provocado por la interacción de los niveles en el sistema.
- No se considera interferencias provocadas por:
  - Fallas en los buzones de carguío que se encuentran en la parte inferior de los piques de traspaso.
  - Mal funcionamiento de los puntos de extracción debido a colgaduras, presencia de agua u otros eventos.
  - Trancaduras u otros eventos que pudiesen comprometer el normal funcionamiento de los piques de traspaso.
  - Las pérdidas de tiempo que pudiesen provocar los horarios de colación en el turno.
  - Eventos como estallidos de roca, derrumbes u otros eventos que pudiesen comprometer infraestructuras como calles, zanjas o puntos de extracción.
- Los tiempos de ciclo de los equipos y los tiempos en que los equipos se encuentran en mantenencias programadas y no programadas, serán tiempos promedios, según información entregada por expertos en la materia.

## 1.4. Metodología

El trabajo se dividirá en etapas, las cuales buscan lograr objetivos específicos, que serán necesarios para obtener resultados finales confiables y que representen el sistema minero en estudio.

- **Recoger conocimiento:** En esta etapa se dispondrá a realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de los distintos procesos y componentes del sistema minero subterráneo en operación. Además se definirán variables y parámetros relevantes para la construcción del modelo.
- **Desarrollar el modelo conceptual:** El modelo conceptual sirve como plano para levantar los procesos a modelar, mencionara el objetivo que se busca, entregando los límites del modelo, las restricciones que contendrá, los criterios que utilizará, además de los parámetros que considerara. Se definirán los elementos que compondrán el modelo desde un punto de vista operativo.

EL modelo conceptual constara de los siguientes elementos:

- Objetivos
  - Alcances
  - Limite de batería
  - Elementos principales (locations y recursos)
  - Criterios físicos
  - Criterios de operación
  - Parámetros de entrada (que definen comportamiento)
  - Variables de salida (que miden el rendimiento)
- 
- **Preparación de datos:** En esta etapa se realizará un análisis de datos, proveniente de la mina en estudio, para convertirlos en parámetros del modelo. Se determinara la forma de la curva que presentan los datos, se realizaran análisis estadísticos de las distribuciones (mínimo, máximo, media, mediana, etc.) y la construcción de histogramas. Luego se realizará la verificación de la independencia de los datos y se separaran en base a las correlaciones encontradas. Se buscara una distribución de probabilidad que se ajuste a los datos, determinando los valores de sus parámetros, de forma de ajustar a los datos. Finalmente se realizara un test para determinar la calidad del ajuste de una distribución a los datos.
  - **Implementar modelo de simulación:** En esta etapa se realizará la verificación y validación del modelo, La verificación consiste en comprobar que el modelo y el programa se comporten como se espera, es decir determinar si el modelo representa de forma precisa la descripción conceptual y las especificaciones del desarrollador, para esto se observa el desempeño de los algoritmos y la coherencia de los resultados. El proceso de validación permite determinar 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.

- Simulación y análisis de resultados: Se procede a simular el sistema minero, y a analizar las vulnerabilidades y oportunidades encontradas, para finalmente interpretar los resultados.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Marco teórico**

#### **2.1.1. El método de explotación**

Los métodos de explotación de una mina corresponden al conjunto de operaciones, cuyo objetivo final es maximizar la recuperación de un cuerpo mineralizado, asegurando la rentabilidad del negocio. Si bien los métodos ya están definidos en forma general, cada uno de ellos presenta particularidades dadas principalmente por las características propias de cada yacimiento. Entre ellas podemos mencionar: profundidad de emplazamiento, características geotécnicas, composición mineralógica, reservas, etc.

#### **2.1.2. Block/Panel Caving**

El método Block/Panel Caving es aplicado en minería subterránea a cuerpos masivos de mediana a baja ley, cuya característica principal es la fragmentación de la roca producto de los esfuerzos inducidos en el macizo rocoso y el aprovechamiento de la fuerza de gravedad.

El método consiste en el hundimiento de una columna mineralizada, provocado por la socavación controlada de su base mediante perforación y tronadura. Las fuerzas preexistentes que interactúan en la roca se encuentran en equilibrio entre sí. Al socavar la base del bloque se crean nuevas fuerzas denominadas esfuerzos inducidos, estas fuerzas comienzan a redistribuirse, generando y propagando fracturas en la roca. Esto combinado con la fuerza de gravedad genera que el material fragmentado descienda hacia puntos de extracción construidos en la base del bloque. Generando con esto que las fuerzas vuelvan a un estado de equilibrio.

En los puntos de extracción el material fragmentado se retira mediante maquinarias, cuando esto ocurre nuevamente se rompe el equilibrio entre las fuerzas y el material continúa fragmentándose y cayendo, sucesivamente hasta que en la superficie comienza a generarse un cráter. La cual es denominada subsidencia.

El proceso termina cuando se ha extraído la totalidad de la columna de mineral y los puntos comienzan a ser rellenados con material estéril.

#### **2.1.3. Mina subterránea agregada por niveles**

Para llevar a cabo el método de explotación antes descrito, es necesario el desarrollo de distintos niveles operacionales al interior de la mina, en los cuales se desarrollan diferentes labores, operan diferentes equipos y tienen distintos diseños. Este sistema de niveles permite juntar el mineral proveniente de cada uno de los puntos de extracción, agrupándolo en excavaciones verticales llamadas piques, que conectan los distintos niveles, los cuales van disminuyendo en número hacia los niveles más profundos. Para finalmente retirar el mineral de la mina, desde un número

reducido de piques, mediante un equipo de mayor capacidad en el nivel inferior. Esto con el fin de hacer más eficiente y rentable el proceso.

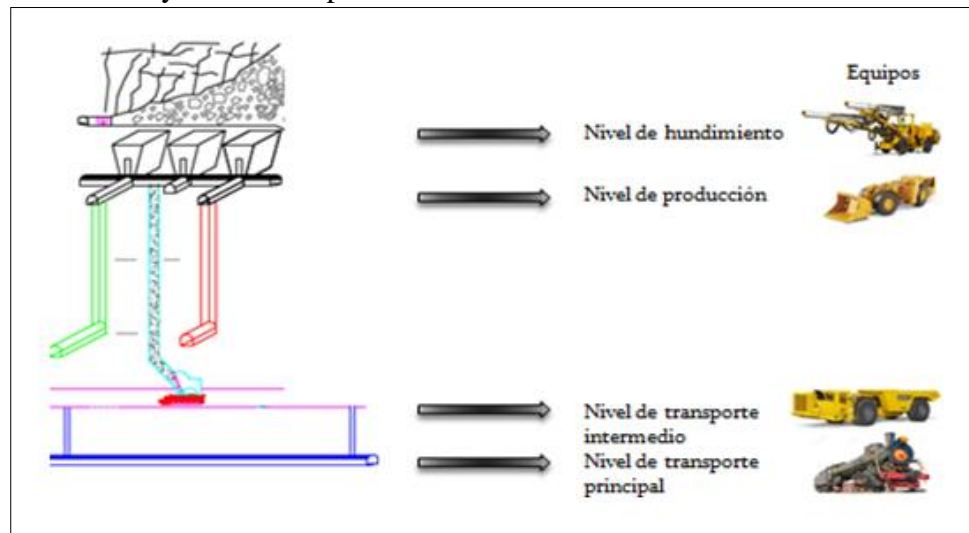


Figura 2: Esquema de un sistema minero agregado por niveles

#### 2.1.4. Nivel de hundimiento (NH)

Es el nivel en el cual se corta la base del bloque mineralizado a ser explotado, mediante métodos de perforación y tronadura. Este nivel no será objeto de análisis en esta memoria, ya que la columna de mineral en el área de estudio ya fue socavada y el mineral fragmentado llega a los puntos de extracción sin interrupciones ni interferencias.

#### 2.1.5. Nivel de producción (NP)

Es el nivel en el cual la roca quebrada es cargada y transportada desde los puntos de extracción mediante equipos mecanizado hacia los piques de traspaso que conectan con el nivel de transporte intermedio.

La configuración de este nivel está dada por galerías paralelas llamadas calles, las cuales se encuentran distanciadas aproximadamente 30 metros, las que son cortadas por galerías de menor longitud llamadas zanjas, las que se encuentran distanciadas aproximadamente por 15 metros, e ingresan hacia los puntos de extracción.

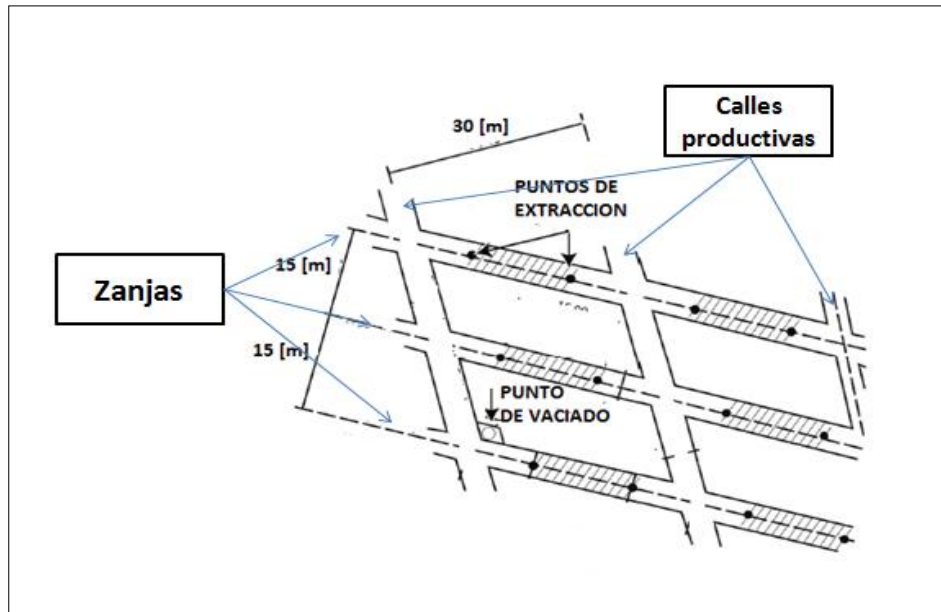


Figura 3: Esquema del nivel de producción

#### 2.1.5.1. Punto de extracción

Corresponde al lugar donde se produce el carguío del mineral quebrado, mediante equipos LHD, el cual cae por un conducto denominado batea, que conecta el nivel de producción con el nivel de hundimiento. A este punto de extracción se accede mediante las zanjas que se disponen a lo largo de las calles productivas.

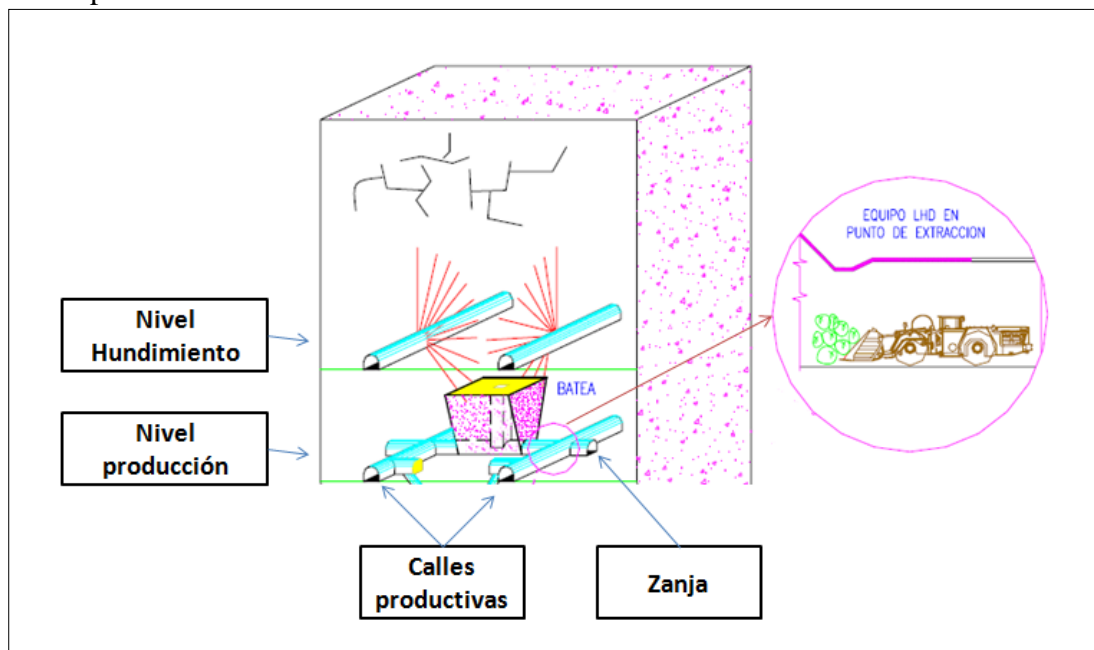


Figura 4: Esquema punto de extracción

### 2.1.5.2. Punto de vaciado

Otro elemento importante de este nivel son los puntos de vaciado, en este lugar se ubica un piques de traspaso (ore passes), que corresponde a una construcción vertical o subvertical cuyo objetivo es el transporte de mineral, estéril y/o relleno desde un nivel a otro en una mina subterránea, sirviendo también como almacenaje de estos componentes.

En este punto el LHD vacía el material recolectado desde el punto de extracción. Dependiendo de la calle puede existir uno o varios piques, estos cuentan en su extremo superior con una parrilla y un martillo, el cual cumple la función de asegurar una granulometría específica del mineral que pasa al siguiente nivel. Mientras que en el extremo inferior se ubica un buzón, que cumple la función de entregar el material de manera controlada, al equipo que opera en el nivel inferior encargado de recibir este material.

#### 2.1.5.2.1. Parrilla y martillo picador

Las parrillas son harneros que sirven para controlar la granulometría máxima que pasa por un pique de traspaso. Generalmente son estructuras de acero las cuales deben resistir la reducción del sobretamaño sobre ellas. Esta última es llevada a cabo por un martillo, disminuyendo el tamaño de las rocas realizando una operación de mucho impacto sobre la parrilla.

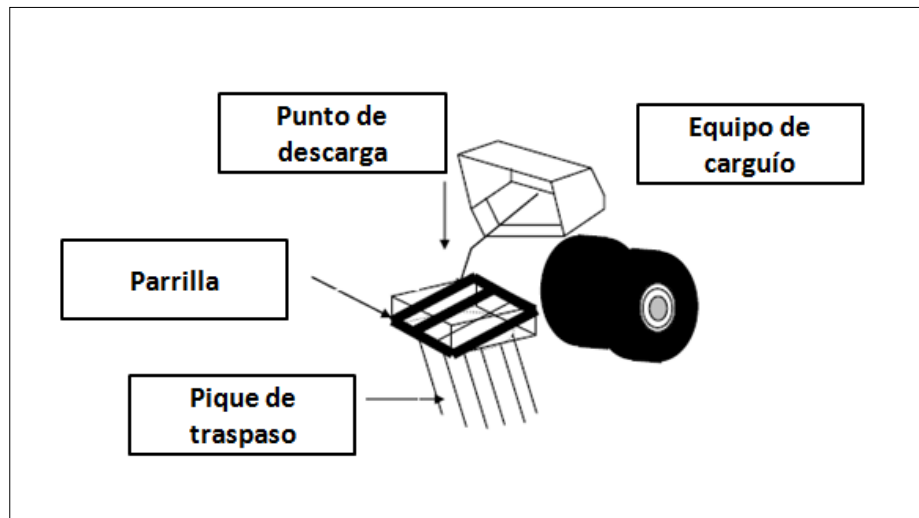


Figura 5: Esquema del punto de descarga con parrilla

#### 2.1.5.2.2. Buzón

Los buzones corresponden a sistemas de carguío estacionarios que se ubican en el extremo inferior de las chimeneas. Reemplazan al tradicional sistema de carguío mediante cargador frontal, permitiendo obtener menores tiempos y costos de la operación, menores requerimientos de ventilación y mayor seguridad.

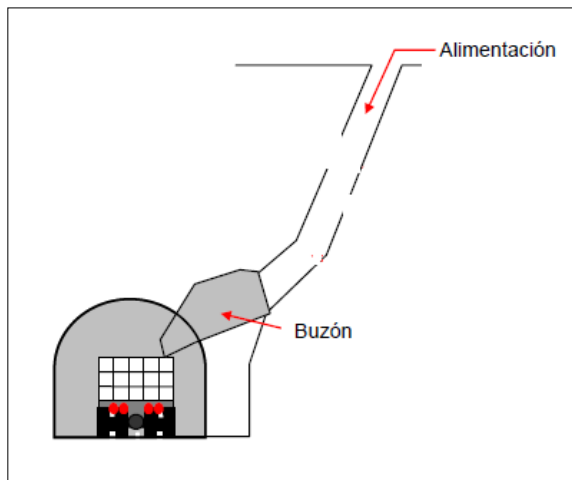


Figura 6: Esquema de pique de traspaso con buzón de carguío.

#### 2.1.5.2.3. Capacidad de carga viva

Esta capacidad de carga viva se entiende como la cantidad máxima de material que puede ser cargado o descargado al pique, debido a que el nivel de llenado de éste nunca baja más allá de un cierto límite, esto con el objetivo de evitar posibles daños a la estructura

#### 2.1.5.2.4. Tiempo por pique lleno

Se refiere al tiempo en el pique de traspaso se encuentra lleno, es decir con la capacidad máxima de mineral que puede almacenar. Durante este periodo los equipos no puede descargar mineral a esta infraestructura.

#### 2.1.6. Nivel de transporte intermedio (NTI)

Es el nivel donde se realiza el carguío mediante buzones y posterior transporte mediante camiones, del mineral proveniente del nivel de producción. La configuración de este nivel es distinto al nivel de producción, ya no hay calles ni estocadas, las galerías tienen forma de “loops” los cuales son eficientes para que los camiones minero que transitan por el nivel, con radios de giro mayores, puedan circular fácilmente y recoger el mineral. En este nivel los camiones reciben el mineral proveniente del nivel de producción mediante buzones, luego lo transportan hacia piques principales que llegan hasta el nivel de transporte principal.

#### 2.1.7. Nivel de transporte principal (NTP)

Es el nivel donde se realiza el carguío mediante buzones y posterior transporte mediante trenes, del mineral proveniente del nivel de transporte intermedio.

#### 2.1.8. Interferencias operacionales

Las interferencias operacionales corresponden a eventos o condiciones que perjudican el funcionamiento de la operación, impidiendo que esta se realice de la forma que se tiene presupuestada. Estas interferencias afectan la productividad del sistema minero y por ende la planificación minera. Este tema es de gran relevancia dentro de los sistemas mineros que son agregados por niveles, ya que estas interferencias operacionales pueden no solo afectar al sector o nivel en que ocurren, sino que también comprometer el comportamiento de la operación en los demás niveles. Dentro de la operación podemos encontrar diversos lugares o procesos donde pudiesen aparecer interferencias con la operación, dentro de los cuales vamos a destacar al menos los siguientes: puntos de extracción, piques de traspaso y los equipos mineros.

#### 2.1.8.1. Puntos de extracción

A nivel de puntos de extracción podemos identificar al menos los siguientes tipos de interferencias operacionales, asociados a su fenomenología:

<b>FENOMENOLOGÍA</b>	<b>INTERFERENCIAS OPERATIVAS</b>
<b>Grado de fragmentación</b>	<b>Colgadura</b>
	<b>Sobretamaño</b>
<b>Humedad</b>	<b>Barro</b>
	<b>Enlampamiento</b>
<b>Campo de esfuerzos</b>	<b>Inestabilidad</b>
	<b>Colapso</b>

Tabla 1: Interferencias operacionales asociadas a los puntos de extracción

Una colgadura se refiere a la formación de un arco estable de rocas de mineral o bloques que se atascan en lo alto de la columna de mineral, que impide el libre flujo gravitacional, dejando inoperante el o los puntos de extracción afectados.

Dependiendo de la altura donde se genere este arco, el impacto en la operación es diferente:

A baja altura en el mejor de los casos afectara solo a un punto de extracción, este problema puede ser resuelto con técnicas de fragmentación secundaria. Un arco a media altura resulta ya inaccesible para su fragmentación y puede afectar varios puntos de extracción, sin embargo, una característica en común entre ambas es que el arco estable se forma en material ya fragmentado por el proceso de hundimiento y pueden detectarse tempranamente por la simple observación del punto de extracción. Un tercer y más peligroso tipo de colgadura son aquellas que se forman debido a que el proceso natural de quiebre de la roca se ha detenido y la extracción en niveles inferiores ha continuado.

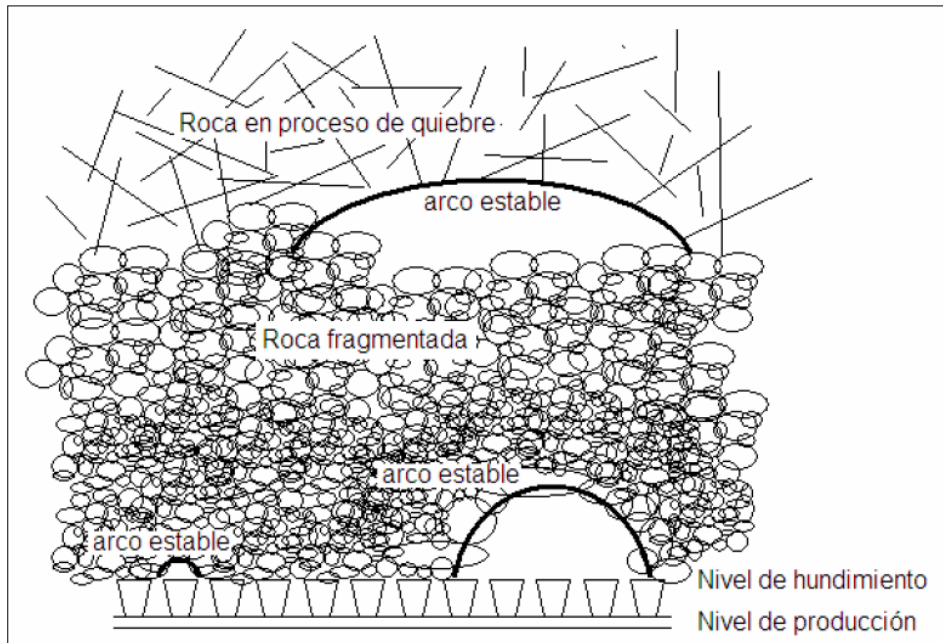


Figura 7: Esquema de colgaduras en los puntos de extracción

Otra interferencia operacional es el sobretamaño, entendiéndose este como la aparición de colpas (rocas de un tamaño superior al manejable por los equipos de carguío o parrillas) en los puntos de extracción, interrumpiendo el carguío de material.

La interferencia operativa por barro 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 del sistema. Flujos menores de barro a través de los puntos de extracción no implican su paralización, debido a 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.

Los enlompamientos son otro tipo de interferencia que se detecta a nivel de los puntos de extracción. Se produce por la compactación de material fino, que juntos a la presencia de agua y bajas temperaturas genera un aglomerado de material que imposibilita el carguío de material.

La explotación minera por hundimiento genera una gran redistribución de esfuerzos al interior del macizo rocoso, debido a que en general, el material fragmentado no puede transmitir esfuerzos. Eventualmente la infraestructura minera no es capaz de resistir la condición de esfuerzos imperantes, generándose condiciones de inestabilidad y deformaciones importantes en las excavaciones que hacen imposible la utilización del sector por motivos de seguridad. En un caso extremo la roca colapsa bajo su propio peso luego de haber alcanzado su límite máximo de deformación.

#### 2.1.8.2. Piques de traspaso

El escurrimiento del mineral a través de un pique debe ser totalmente expedito y libre. Al almacenar material en los conductos este tiende a compactarse a medida que la columna crece, la roca tiende a formar un arco natural conocido como colgadura de un pique.



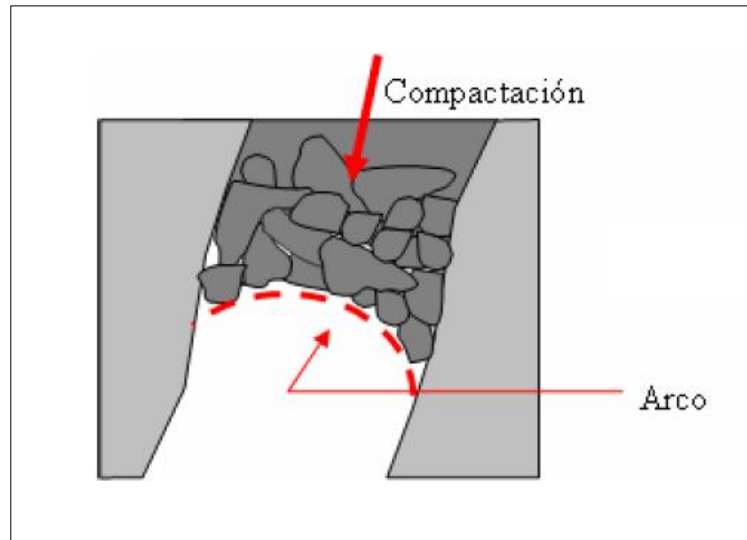


Figura 8: Esquema de colgadura de un pique

En zonas donde hay bajas temperaturas puede que sea frecuente el congelamiento del material debido a la presencia de agua entre los espacios del material, lo cual genera colgaduras (1). Otra consideración es que el material fino puede generar compactación en las paredes del pique produciéndose el enlompamiento y por consecuencia la disminución de la sección de este (2). Por último la erosión que sufre el pique puede un caseroneo (aumento del diámetro del pique producido por derrumbes) el cual puede ser de ayuda si este material que fue desprendido fluye junto al resto del material (3), pero en algunos casos puede desprenderse un bloque de tal magnitud que bloquee el pique interrumpiendo la operación (4).

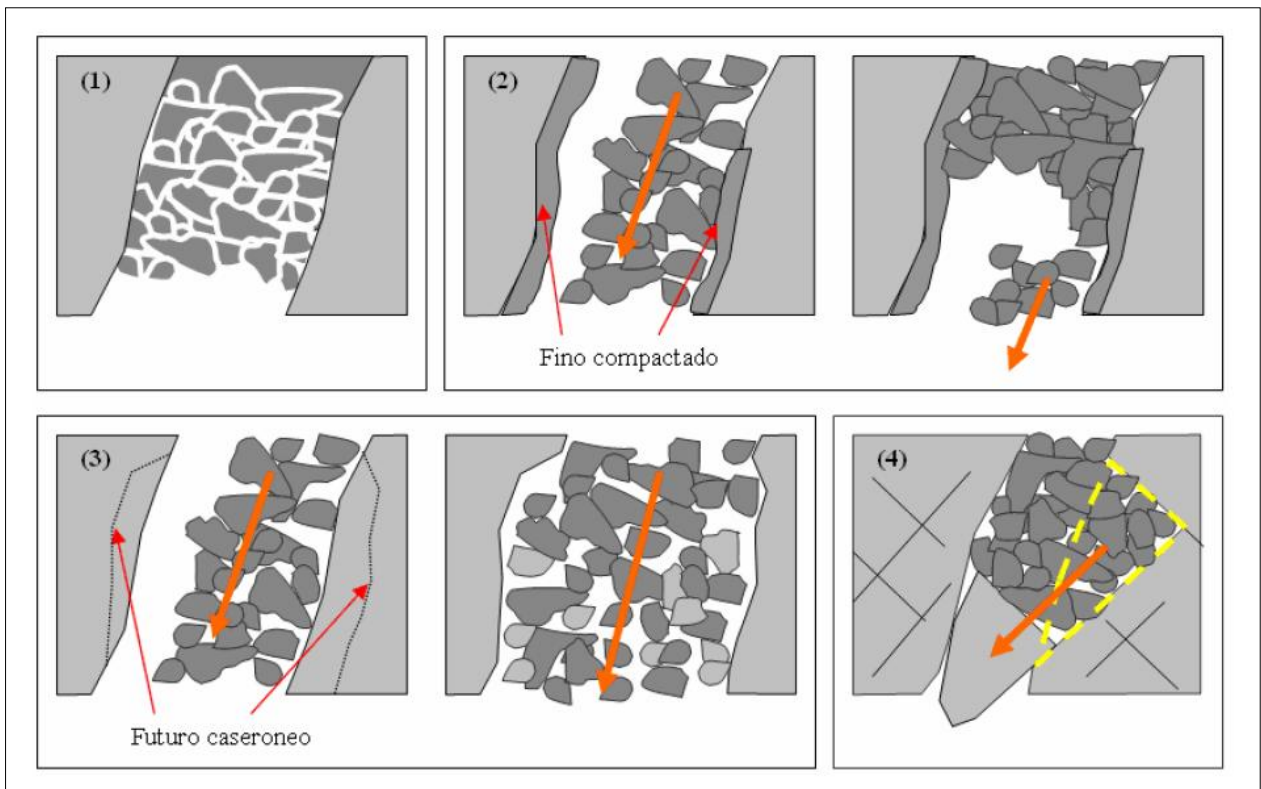


Figura 9: Interferencias operacionales en el pique de traspaso

### 2.1.8.3. Fallas en equipos mineros

Los equipos mineros son elementos fundamentales para poder realizar las operaciones unitarias, que en conjunto hacen que el sistema minero sea productivo. Es muy importante que las máquinas operen según lo planificado, para poder cumplir con el plan productivo de la faena minera. Al igual que en cualquier industria, los equipos mineros tienen mantenciones programadas cada ciertas horas de trabajo, esto con el fin de evitar fallas que pudieran comprometer las operaciones en las que participan. A pesar de lo anterior, los equipos eventualmente pueden presentar fallas, daños o condiciones que no permitan que estos sean operados bajo condiciones seguras, estas se pueden deber a diversos factores como por ejemplo: estado de las carpetas de rodado, condiciones del área de carguío y descarga, factores humanos, granulometría del mineral a cargar, mantenciones a destiempo o ineficientes etc.

Estas interferencias operacionales pueden afectar la productividad, ya que producen un desbalance del sistema de manejo de materiales, afectando no solo al nivel en que se encuentra el equipo sino también a los demás niveles mineros. Esto debido a que la flota de equipos que operan en cada nivel, está diseñada para manejar el material proveniente de los niveles superiores, y a su vez entregar la cantidad de material acorde a las capacidades de los niveles inferiores, de manera que los equipos y el sistema funcione de manera eficiente.

### 2.1.9. Equipos mineros

En un sistema minero subterráneo encontramos diversas operaciones unitarias (perforación, tronadura, carguío y transporte) además de operaciones auxiliares que dan soporte a las anteriores (soporte, ventilación, drenaje, comunicaciones, etc.), cada una de estas operaciones utiliza equipos específicos que permiten realizar la labor de manera más eficiente y segura. Para el estudio realizado por esta memoria solo serán analizadas las operaciones de carguío y transporte, las cuales para el caso particular de esta faena minera utilizan los siguientes equipos: LHD, camiones y trenes.

#### 2.1.9.1. LHD

Estos equipos son utilizados en el nivel de producción, cumplen las labores de carguío y transporte (corresponde a un equipo mixto) del mineral, La funciones de este equipo contemplan principalmente el carguío de mineral en los puntos de extracción, transporte hacia los piques de traspaso y descarga del material en el punto de vaciado, también son utilizados para el traslado de marina (material resultante del proceso de construcción de galerías subterráneas, mediante perforación y tronadura).

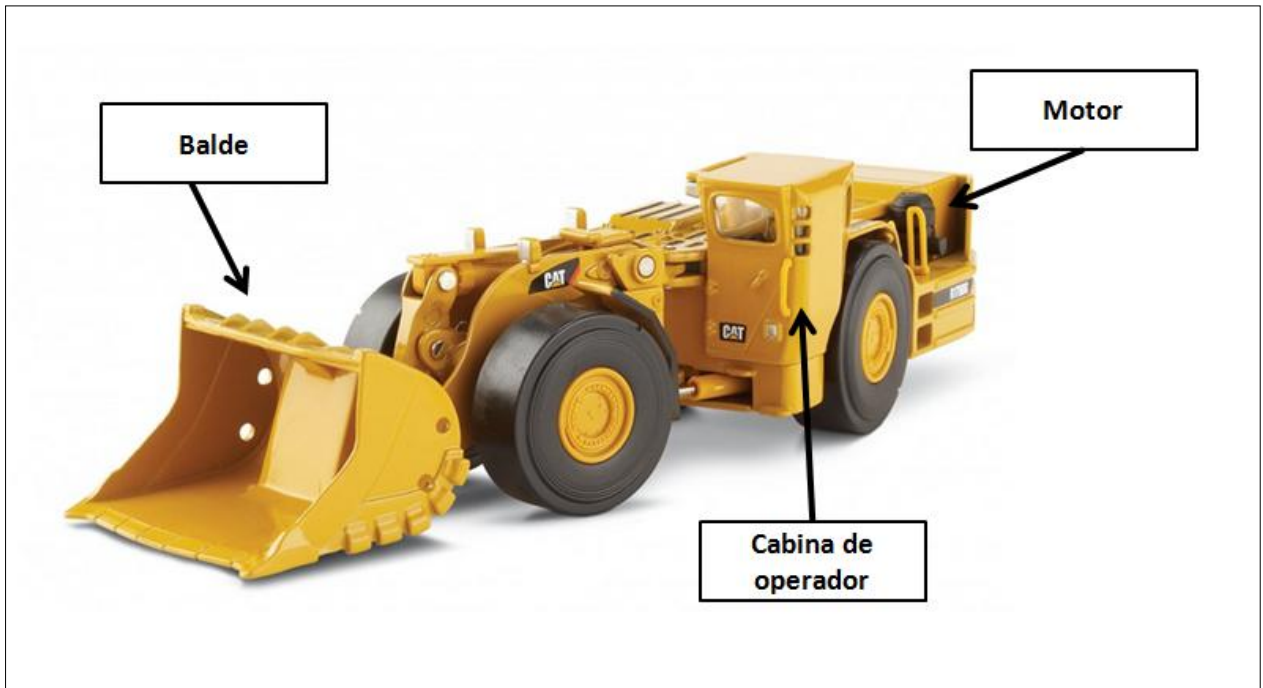


Figura 10: Equipo LHD

Estos equipos son diseñados especialmente para trabajar en minería subterránea:

- Pequeños radios de giro.
- Angostos y baja altura.
- Gran capacidad de tolva.
- Buena velocidad de desplazamiento.
- Descarga a camiones, piques y piso.
- Existen diesel y eléctricos.

El tamaño del LHD es función del layout disponible, recuperación, productividad, distancias a recorrer y fragmentación esperada.

El tipo de LHD a escoger (diesel o eléctrico) dependerá de los requerimientos y la experiencia práctica que se tenga en la faena. Dentro de las consideraciones a tener se encuentran las siguientes:

ITEM	LHD Diesel	LHD eléctrico
<b>Flexibilidad</b>	Flexibles y fáciles de mover no solo para cambiar el equipo en un nivel sino para usarlo en otras actividades como limpieza de calles y barro	Están limitados a la zona de producción Limita el acceso a las zonas de trabajo Se limita el uso de las unidades a otras tareas lo que es bueno
<b>Reducción secundaria</b>	Se puede realizar reducción secundaria detrás de las máquinas	Se debe tener cuidado con los cables eléctricos
<b>Ventilación</b>	Requieren de aire fresco en la frente	Operan bajo mínimos requerimientos de aire → se debe considerar polvo
<b>Automatización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Es posible automatizar estos equipos.</li> <li>•No se pueden hacer conexiones con barreras de seguridad eléctricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Es posible automatizar estos equipos.</li> <li>•Se pueden hacer conexiones con barreras de seguridad eléctricas y la unidad que permite el apagado del equipo en condiciones de emergencia.</li> </ul>
<b>Otros</b>		Carga mejor Alta disponibilidad Menor costo capital Silencioso Mas frío

Tabla 2: Comparación entre LHD diesel y eléctrico

#### 2.1.9.2. Camiones

Los camiones corresponden a equipos de transporte de materiales, corresponden a un sistema de transporte discontinuo (a diferencia de correas transportadoras que corresponden a un sistema continuo). Estos equipos son utilizados en minería subterránea como a cielo abierto. Existen diversos tipos de camiones dentro de los que podemos destacar los camiones de carretera y los camiones mineros. Los primeros tienen un precio de adquisición bajo, comparado con los mineros, comúnmente entre los 60.000 y 140.000 dólares, son equipos operados por diesel y no cuentan con articulación central, la vida útil de estos equipos es baja ya que no están hechos para operar en las condiciones severas que impone la minería, típicamente tienen 2 a 3 años de vida útil.



Figura 11: Camión de carretera

Por otro lado los camiones mineros o dumpers, se utilizan en el transporte de materiales en minería subterránea, son equipos especialmente diseñados para operar bajo las exigencias y dificultades que presentan las faenas mineras subterráneas, se distinguen por su capacidad de transporte y sus bajas dimensiones, son equipos diesel o eléctricos, cuentan con articulación central, el precio es muy superior a los camiones de carretera, comúnmente entre los 280 y 570 mil dólares, y la vida útil típica de estos equipos es de 5 a 6 años.



Figura 12: Camión minero subterráneo

Estos equipos son utilizados en minería de block/panel caving, cumpliendo la función de transportar el mineral que es cargado ya sea mediante equipos LHD o mediante buzones ubicados en piques de traspaso de mineral, para luego ser transportados hacia otros piques de traspaso o hacia el exterior de la mina.

### 2.1.9.3. Trenes

Este sistema se utiliza para el transporte horizontal de materiales (pendientes de 0 a 2%), en minas de alta capacidad productiva, con distancias de transporte considerables. Al circular sobre

rieles estos equipos tienen rutas fijas a diferencia de los camiones. Tienen como principales ventajas la alta productividad, confiabilidad, seguridad, bajo costo de mantenimiento y operación. En cambio posee desventajas como la alta inversión inicial, altos costos de instalación, talleres de mantenimiento especializados y baja flexibilidad en el transporte. Se tienen del tipo diesel y eléctricos, pudiendo ser autónomos, es decir sin necesidad de utilizar un conductor.

#### 2.1.10. Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo en el proceso de carguío y transporte se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de ciclo} = \text{Tiempo de viaje vacío} + \text{Tiempo de carguío} + \text{Tiempo de viaje lleno} + \text{Tiempo de descarga}$$

#### 2.1.11. ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina, o instalación incurren durante la operación.

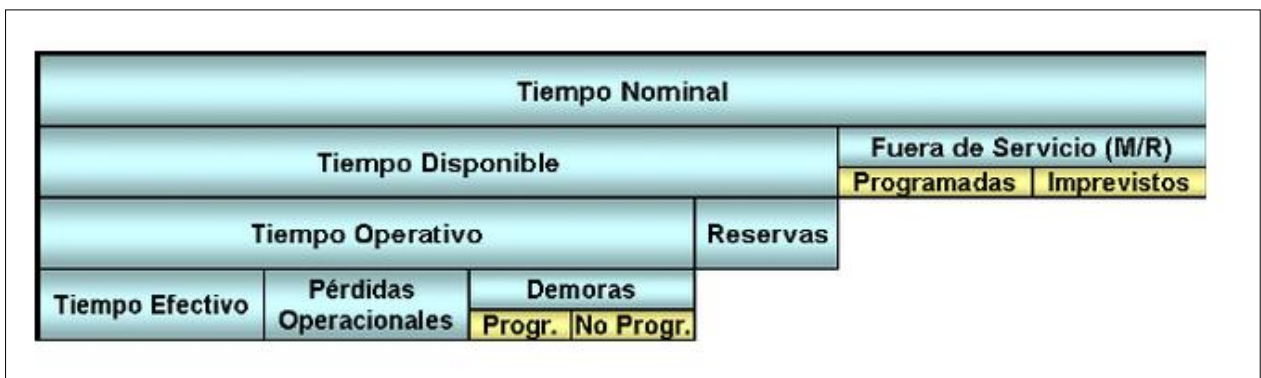


Figura 13: Definición gráfica de tiempos según norma ASARCO

Donde:

- **Tiempo Nominal:** Corresponden al espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Este tiempo dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- **Fuera de servicio:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico.
- **Tiempo disponible:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra electromecánicamente habilitado para operar.
- **Tiempo operativo:** Espacio de tiempo en que el equipo está operando (con operador).
- **Tiempo de reserva:** Corresponde al espacio tiempo en que el equipo está electromecánicamente disponible para trabajar, pero no está siendo utilizado en labores

productivas, ya sea por falta de operador o que bajo condiciones específicas de la faena no pueda ser operado.

- Demoras programadas: Espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como colación o cambio de turno.
- Demoras no programadas: Espacio de tiempos en que el equipo no opera, debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como carga de combustible, acomodo o limpieza del lugar de faena, etc.
- Perdidas operacionales: Espacio de tiempo en que el equipo no puede operar, debido a la espera de equipo complementario, tales como sistemas de alumbrado, martillo picador, etc.
- Tiempo efectivo: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para los cuales fue adquirido y diseñado.

#### 2.1.11.1. Disponibilidad y utilización de los equipos

Según esta distribución de tiempos definimos los conceptos de disponibilidad y utilización de equipos

- $Disponibilidad [\%] = \frac{Tiempo\ disponible}{Tiempo\ nominal} \times 100$
- $Utilización [\%] = \frac{Tiempo\ operativo}{Tiempo\ disponible} \times 100$

Se cuenta con información relevante acerca de estos índices en faenas en actual operación. Estos valores se ocuparan como referencias al momento de realizar los estudios.

Disponibilidad LHD y camiones	70 - 75 [%]
Utilización LHD y camiones	60 - 65 [%]

Tabla 3: Disponibilidades y utilizaciones de equipos

#### 2.1.12. Tasa de extracción

La velocidad o tasa de extracción se define como la cantidad de material que se extrae desde un área determinada durante un tiempo específico. Esta tasa puede ser calculada tanto para un punto de extracción como para el área completa en explotación. En la práctica existen restricciones tanto para la velocidad máxima del punto como la del área.

En general la tasa de extracción actúa como una cota restrictiva, en primer lugar esto es porque no se debe extraer a mayor velocidad que la velocidad en que se va generando el material debido a la propagación del caving (velocidad de propagación), la segunda etapa ocurre inmediatamente después de la primera y se conoce como la velocidad de régimen. En esta parte el cerro ha alcanzado su fragmentación completa, el caving ha llegado a superficie, o ha conectado con material quebrado superior y por tanto es posible extraer a mayores velocidades, pero restringido siempre por el sistema de manejo de materiales.

### 2.1.13. Simulación de procesos

Se refiere a la construcción de un modelo abstracto que representa algún sistema de la vida real. Simulación es 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.

Entre nuestras razones para experimentar con un modelo en lugar del sistema real podemos destacar:

- El sistema es demasiado complejo como para resolverlo analíticamente
- Experimentar con el sistema minero es costoso
- Experimentar con el sistema es inapropiado y peligroso

Existen varios software de simulación en el mercado, dentro de los cuales podemos destacar por ser los más conocidos:

- Arena
- Automod
- Flexsim
- Promodel
- Simul8
- Slam 2
- Witness

Para realizar la simulación en Promodel, el software que se utilizara en esta memoria, es necesario definir ciertos elementos de programación:

- Entidades: La entidad es un objeto que circula por el modelo, a la cual le ocurren procesos o inicia procesos al llegar a una locación. Por ejemplo: piezas en una fábrica, materiales, personas, etc.
  - Entidad real: Correspondientes a las entidades que son parte de la modelación.
  - Entidad virtual: Correspondientes a entidades ficticias, que no forman parte de la modelación, pero sirven de apoyo para la modelación.
- Locaciones: Representan lugares fijos en el modelo del sistema, en las cuales ocurre interacción con las entidades. Por ejemplo: maquinas, colas, aéreas de almacenamiento, estaciones de trabajo, etc.
- Recursos: Los recursos representan objetos móviles cuya función es desplazar a las entidades dentro del sistema. Por ejemplo: Camiones, personas, robots, etc.

#### 2.1.13.1. Simulación de evento discreto (SED)



Se refiere a la simulación de sistemas que pueden ser representados por una secuencia o serie de eventos. La simulación describe cada evento discreto, moviéndose de uno a otro, a medida que el tiempo transcurre. Las variables de estado cambian de valor en momentos instantáneos de tiempo, y no en forma continua.

#### 2.1.14. Sistema minero

Unidad productiva que conjuga el comportamiento geomecánico de la roca, las operaciones unitarias, el diseño y geometría de la mina, para cumplir un determinado plan de producción minero a un determinado costo, dilución y recuperación minera.

##### 2.1.14.1. Productividad

En esta memoria nos referimos a la productividad como la cantidad de material extraída por un determinado sistema minero en un determinado tiempo.

##### 2.1.14.2. Plan de producción minero

El plan minero corresponde al programa de producción de corto, mediano y largo plazo de una faena minera, que contempla a lo menos el ritmo de producción, sectores por explotar, leyes y destinos de los diferentes materiales que se extraen.

##### 2.1.14.3. Confiabilidad

Probabilidad de que un determinado sistema minero opere para producir una determinada cantidad de mineral. Es función de la tasa de falla intrínseca de los componentes del sistema minero.

## **2.2. Recopilación Bibliográfica**

Dentro del estudio de antecedentes bibliográficos realizado previamente al análisis de la problemática relevante para esta memoria, se selecciona un primer texto que hace una reseña a los inicios de la simulación de sistemas mineros en Europa y su evolución a lo largo de los años [2]. Luego se expone un trabajo que muestra los beneficios de la simulación en el dimensionamiento de equipos o flotas de equipos [3]. Por último un estudio que analiza el impacto que tiene en la productividad, la frecuencia con que ocurren eventos en los piques de traspaso y calles de producción [4].

### 2.2.1. Evolución de la simulación de sistemas mineros en Europa

La simulación de sistemas es una técnica que ha ganado una creciente popularidad, a la hora de realizar la planificación y el diseño, de nuevas operaciones mineras, o mejorar la ya existente.

La primera que vez apareció la simulación de una operación minera, fue a fines de 1950, en un trabajo realizado a mano por varios investigadores, en una mina al noreste de Suecia. Uno de estos estudios fue el sistema de transporte, de la mina subterránea de hierro Kiruna.

En 1970, Wilke reportó el desarrollo de un modelo de simulación, para el estudio del transporte mediante trenes, en minas de carbón en Alemania. EL modelo utilizaba la simulación Montecarlo para optimizar el tráfico subterráneo de tres zonas hacia un pique. Esta fue solo la segunda aplicación del lenguaje de simulación GPSS, el cual es ampliamente usado hoy en día en la simulación de sistemas mineros.

The National Coal Board, en UK., desarrolló varios modelos para la simulación de actividades de transporte subterráneo, los cuales fueron presentados por Hancock et al, en 1984. Donde fueron descritos varios programas de simulación desarrollados en Fortran (SIMBELT 2, SIMBELT4, SIMBULK). Es característico de estos estudios tempranos en simulación, que todos ellos modelan la operación de sistemas de acarreo subterráneo.

Luego de esto, en la década de los 90 fueron desarrollados diversos programas, para simular, estocásticamente minas a cielo abierto. Agioutantis en 1998 describe el desarrollo de un simulador, para minas en superficie, el cual modelaba seis subsistemas de producción. Un paquete de simulación llamado Micro Saint, el cual permitía el rápido desarrollo de modelos como también animación, fue utilizado en este trabajo.[2]

### 2.2.2. Dimensionamiento de sistema de manejo de materiales

Al momento diseñar un nuevo sistema de manejo de materiales o modificar uno existente, a pesar del trabajo de ingeniería que se ha realizado previamente, no se tiene la certeza si el dimensionamiento es el adecuado hasta que éste se encuentre en operación. Los programas de simulación permiten modelar el sistema y encontrar áreas de sobredimensionamiento o subdimensionamiento antes de construirlos. A continuación se detalla la simulación de dimensionamiento de equipos utilizando el software de simulación SIGMA.

El análisis se basa en el estudio de una mina de cobre a rajo abierto, ubicada en el sudeste de Estados Unidos, la tasa de producción fijada para la mina es de 21.5 Kton por día. En la ilustración 1 se muestra el flowsheet del proceso. [3]

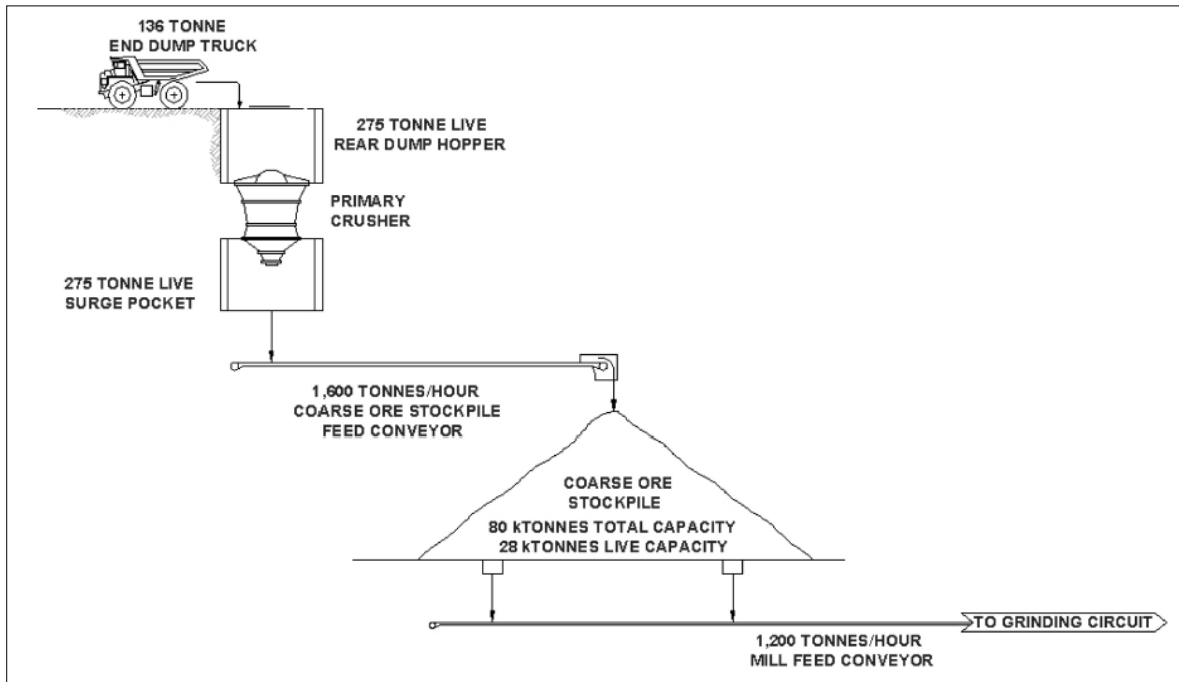


Figura 14: Flowsheet del sistema de manejo de materiales de la mina a rajo abierto en estudio.

En la tabla 4 se detallan los parámetros de diseño del modelo:

Parámetro	Valor	Unidad
Tolva de chancado	250	ton
Correa transportadora	1600	ton/h
Capacidad del chancador	1600	ton/h

Tabla 4: Parámetros de diseño del sistema de manejo de materiales

Tabla 5: Parámetros de diseño de equipos utilizados en el manejo de materiales de la mina en estudio.

El modelo fue corrido 3 veces y el tiempo simulado por corrida fueron 30 días. A partir de los resultados obtenidos se pudieron observar varios defectos en el dimensionamiento del sistema, a modo de ejemplo en la ilustración 2 se muestra el gráfico de la cantidad de mineral en la tolva de chancado, durante la simulación.

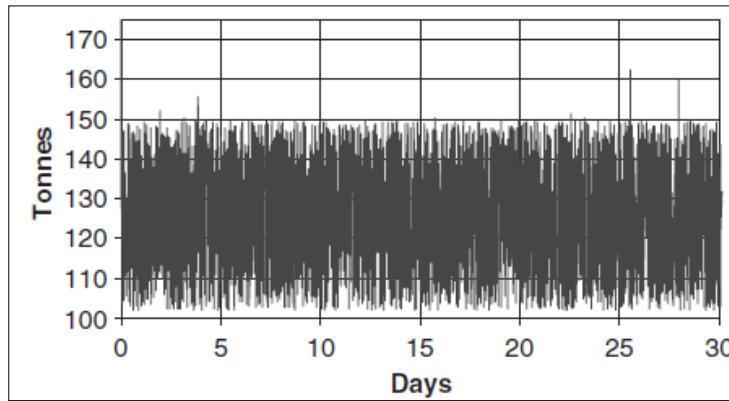


Figura 15: Mineral presente en la tolva de chancado durante el periodo de simulación.

Como se puede apreciar, el valor nunca supera las 170 toneladas, esto quiere decir que al construir una tolva para 250 toneladas, se está sobredimensionando el sistema. Así también se observaron otros sobredimensionamientos, obteniéndose finalmente la tabla 2 en la cual se muestran las dimensiones para los equipos, gracias a la simulación realizada.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Tolva de chancado	175	ton
Correa transportadora	1200	ton/h
Capacidad del chancador	1050	ton/h

Tabla 6: Parámetros de diseño de los equipos luego de la simulación.

### 2.2.3. Impacto en la productividad del nivel de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción

El estudio presentado a continuación, se realizó en la mina DOZ, de la compañía Freeport Indonesia. La cual corresponde a una mina subterránea, explotada por el método de hundimiento Block/Panel Caving.

Se determinó la producción de la mina, tomando en cuenta interferencias operacionales como sobretamaños, colgaduras y colapsos. En la ilustración 3 se muestra el tonelaje extraído de la mina en relación con el tonelaje planificado a extraer:

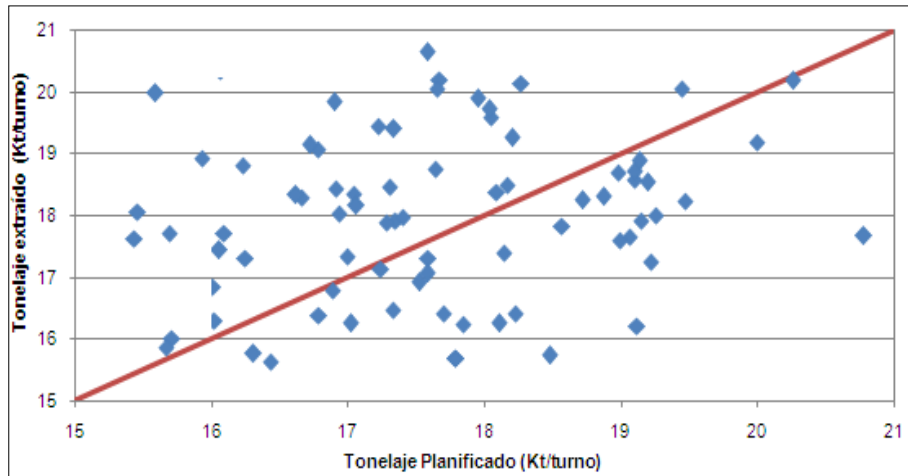


Figura 16: Tonelaje extraído vs tonelaje planificado de DOZ

Se puede observar que los datos se encuentran muy dispersos, existiendo una desviación en lo planificado para ser extraído en el turno operacional. lo cual denota una baja confiabilidad del sistema para cumplir lo planificado en el turno de trabajo de la mina.

Se realizó la simulación de la producción de la mina, considerando las interferencias operacionales, para esto se utilizó el software de simulación ARENA.

El modelo realizado de simulación tiene las siguientes características:

- Puntos de extracción: 20
- Calles productivas: 1
- Piques de traspaso: 1
- Equipos LHD: 1

En la ilustración 4 se muestra el diagrama del sistema simulado

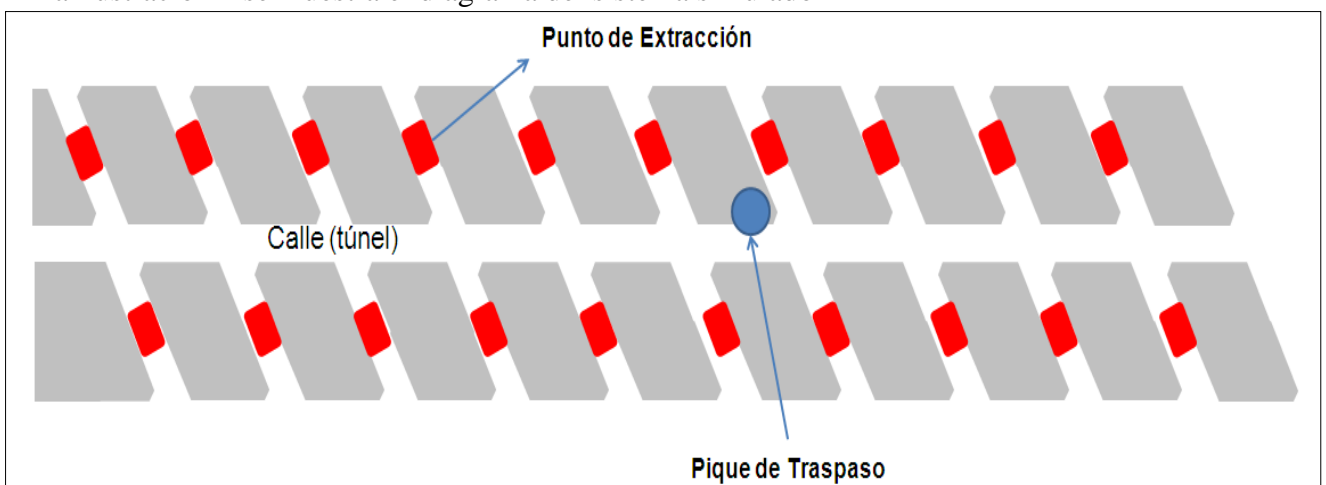


Figura 17: Diagrama del sistema simulado de DOZ

Se realizaron 5 corridas de la simulación, y el tiempo simulado fueron 1260 días, de 15 horas operativas.

La variable de entrada para el modelo fue la frecuencia de eventos en los piques de traspaso, la cual es medida como tonelaje pasado entre eventos. Las frecuencias utilizadas fueron 0, 7.000, 15.000, 21.000 y 50.000 toneladas entre eventos. Mientras que los eventos en los puntos de extracción, fueron dados como parámetros estocásticos.

En la ilustración 5 se muestran los resultados obtenidos:

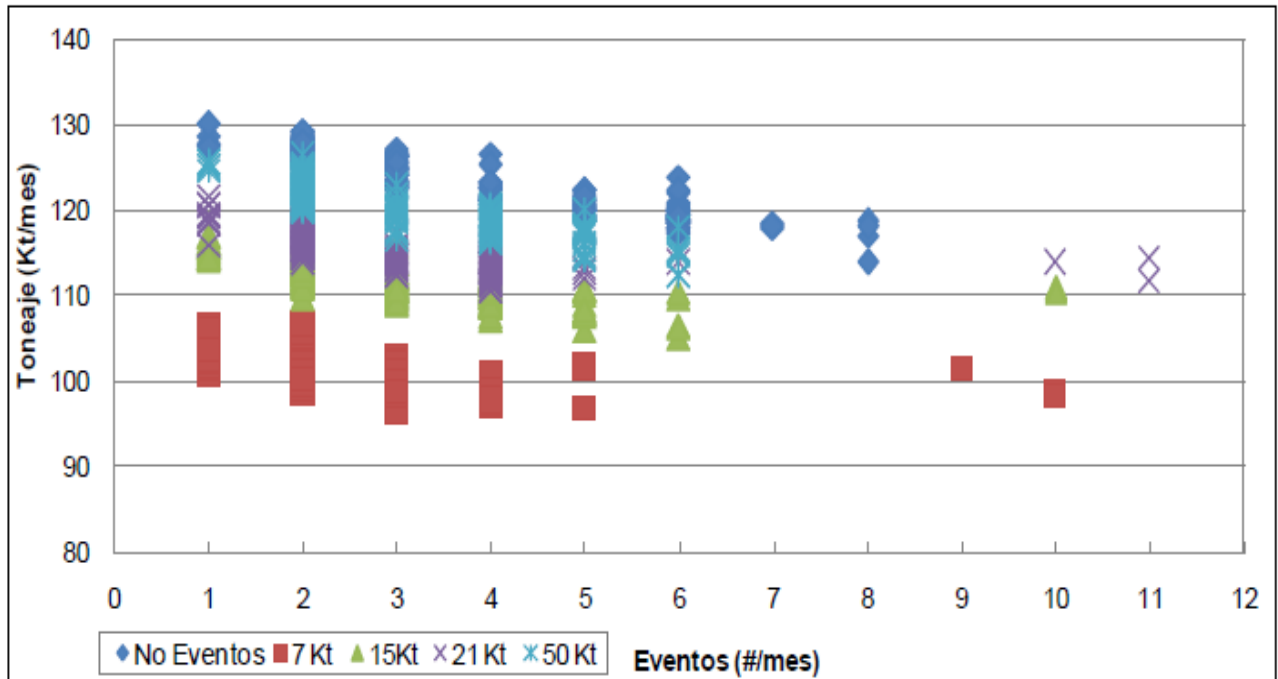


Figura 18: Tonelaje producido en función de frecuencia de eventos en calle y pique

Se puede apreciar que la productividad disminuye, a medida que aumentan los eventos en la calle. Además al aumentar la frecuencia de eventos en el pique, disminuye la producción. Esto puede generar diferencias de hasta 35.000 toneladas por día, en la producción de la calle.[4]

#### 2.2.4. Conclusión

Luego de observar los resultados expuestos aquí, apreciamos la relevancia que tiene la simulación de procesos a la hora de evaluar sistemas complejos como la producción de un sector en una mina subterránea o el dimensionamiento de ciertos equipos para sistemas de manejo de materiales. A pesar de que en ambos casos hay estudios que avalan las dimensiones de los equipos que se utilizan y los planes mineros que se aplican, en la realidad los sistemas no siempre se comportan de la misma forma en que fueron planteados por las ingenierías, principalmente debido a que no consideran las fuentes de incertidumbre y variabilidad inherente de estos. La importancia de la simulación radica en el hecho de poder integrar estas conductas y observar

cómo se comportan los sistemas en operación, permitiéndonos conocer los verdaderos requerimientos de equipos y sus dimensiones en el primer caso y obtener distribuciones de probabilidad para la productividad en el segundo caso, con el fin de que los objetivos productivos sean viables y confiables.

## 2.3. Caso de estudio

### 2.3.1. Método de explotación

La mina en estudio es explotada mediante el método Block/Panel Caving agregada por niveles, en donde podemos encontrar un nivel de hundimiento, nivel de producción, nivel de transporte intermedio y nivel de transporte principal.

#### 2.3.1.1. Nivel de producción

En el nivel de producción, el sector que será materia de estudio para esta memoria tiene las siguientes características:

Calles productivas	16
Puntos de extracción	357
Equipos LHD por calle	1
Puntos de vaciado	19

Tabla 7: Características nivel de transporte intermedio

Los equipos de carguío y transporte LHD (Load Houl Dump) transitarán por esta configuración de calles y estocadas, con la particularidad de que operará solo un equipo por calle, el cual recogerá material de los distintos puntos de extracción pertenecientes a esa calle.

Otro elemento importante de este nivel son los puntos de vaciado o piques de traspaso, que corresponde a la infraestructura donde el LHD vaciara el material recolectado en el punto de extracción. Dependiendo de la calle puede existir uno o varios piques, estos cuentan con una parrilla y un martillo en superficie, el cual cumple la función de asegurar una granulometría específica del mineral que pasa al siguiente nivel.

Los puntos de vaciado pertenecientes a este nivel debemos distinguir dos tipos, los que llegan al nivel de transporte intermedio (NTI) y los que llegan al nivel de transporte principal (NTP).

Puntos de vaciado al NTI	15
Puntos de vaciado al NTP	4
Sección pique al NTP	5x5 [m <sup>2</sup> ]
Sección pique al NTI	3x3 [m <sup>2</sup> ]
Carga viva pique al NTP	1620 [t]
Carga viva pique al NTI	583[t]
Densidad utilizada	2,7 $\frac{Kg}{m^3}$

Tabla 8: Características de los piques de traspaso del nivel de producción

<b>PIQUE</b>	<b>Nivel de partida</b>	<b>Nivel de llegada</b>	<b>Calles relacionadas</b>
P6	Producción	Intermedio	6
P7	Producción	Intermedio	7
P8	Producción	Intermedio	8
P9/10_3	Producción	Principal	9 y 10
P9/10_5	Producción	Intermedio	9 y 10
P10_1	Producción	Principal	10
P11/12_2	Producción	Principal	11 y 12
P11/12_4	Producción	Intermedio	11 y 12
P13/14_1	Producción	Intermedio	13 y 14
P13/14_2	Producción	Intermedio	13 y 14
P13/14_4	Producción	Intermedio	13 y 14
P14_3	Producción	Intermedio	14
P15/16_1	Producción	Intermedio	15 y 16
P15/16_2	Producción	Intermedio	16 y 16
P15/16_3	Producción	Intermedio	17 y 16
P17/18_1	Producción	Intermedio	17 y 18
P17/18_2	Producción	Intermedio	18 y 18
P19/20_1	Producción	Intermedio	19 y 20
P7/8_4	Producción	Principal	7/8_4

Tabla 9: Piques del nivel de producción

### 2.3.1.2. Nivel de transporte intermedio

En este nivel se realiza el carguío mediante buzones del mineral proveniente del nivel de producción, para su posterior transporte mediante camiones hasta los puntos de vaciado a piques principales que llegan al nivel de transporte principal.

Número de camiones	4
Piques principales	4
Sección pique principal	5x5 [m <sup>2</sup> ]
Carga viva pique principal	1620 [t]
Densidad utilizada	2,7 $\frac{Kg}{m^3}$

Tabla 10: Características del nivel de transporte intermedio

<b>PIQUE</b>	<b>Nivel de partida</b>	<b>Nivel de llegada</b>
Principal 1	Intermedio	Principal
Principal 2	Intermedio	Principal
Principal 3	Intermedio	Principal



Principal 4	Intermedio	Principal
-------------	------------	-----------

Tabla 11: Piques del nivel de transporte intermedio

### 2.3.1.3. Nivel de transporte principal

Es el nivel donde se realiza el carguío mediante buzones y posterior transporte mediante trenes, del mineral proveniente del nivel de transporte intermedio.

Los piques que llegan a este nivel se encuentran en galerías llamadas cruzados (su abreviación es XC), es importante tener en cuenta qué piques se alojan en cada cruzado, ya que por las dimensiones de los equipos que operan en este nivel, no pueden ingresar dos a la vez al mismo cruzado.

CRUZADO	PIQUE
XC40	9/10-1
	9/10-3
	11/12-2
XC50	7/8-4
XC10	Principal 1 y 3
XC8	Principal 2 y 4

Tabla 12: Ubicación piques del nivel de transporte principal

### 2.3.2. Equipos

Para el estudio realizado por esta memoria solo serán analizadas las operaciones de carguío y transporte, las cuales para el caso particular de esta faena minera utilizan los siguientes equipos: LHD, camiones y trenes.

EQUIPOS	CANTIDAD DE EQUIPOS
LHD	16
Camión	4
Tren	2

Tabla 13: Cantidad de equipos de la faena en estudio

#### 2.3.2.1. LHD

Estos equipos son utilizados en el nivel de producción, cumplen las labores de carguío y transporte del mineral el cual retiran de los puntos de extracción, para su posterior descarga en los puntos de vaciado. Solo opera un LHD por calle productiva y dependiendo del punto de

extracción donde retire el mineral, éste tiene un punto de vaciado en particular donde dirigirse a descargar el material, sin posibilidad de utilizar otro.

Por razones de seguridad y debido al desgaste que sufren los equipos en las labores mineras, estos tienen mantenciones programadas cada una cierta cantidad de horas de trabajo, a pesar de esto, durante el turno los equipos manifiestan fallas que los mantienen inoperantes.

<b>Características de los LHD</b>	
Capacidad	7.5 [t]
Tiempo de ciclo	2.5 [min]
Tiempo entre mantenciones programadas	50 [hrs]
Tiempo inoperante por fallas	117 $\left[ \frac{\text{min}}{\text{turno}} \right]$

Tabla 14: Características de los LHD

### 2.3.2.2. Camión

Estos equipos son utilizados en el nivel de transporte intermedio, cumplen la labor de recibir el mineral almacenado en los piques provenientes del nivel de producción, el cual es cargado mediante buzones alojados en el extremo inferior de los piques de traspaso. Luego del proceso de carguío, transportan el mineral hacia los puntos de vaciado que llegan al nivel de transporte principal.

Por razones de seguridad y debido al desgaste que sufren los equipos en las labores mineras, estos tienen mantenciones programadas cada una cierta cantidad de horas de trabajo, a pesar de esto, durante el turno los equipos manifiestan fallas que los mantienen inoperantes.

<b>Características de los camiones</b>	
Capacidad	60 [t]
Tiempo de ciclo promedio	8 [min]
Tiempo entre mantenciones programadas	50 [hrs]
Tiempo detenido por fallas	87 $\frac{\text{min}}{\text{turno}}$

Tabla 15: Características de los camiones

A diferencia de los equipos LHD, los camiones están facultados para poder recoger mineral de cualquier pique, y pueden descargar el material en cualquiera de los 4 puntos de vaciado que llegan al nivel de transporte principal.

### 2.3.2.3. Tren

Estos equipos operan en el nivel de transporte principal, cumplen la labor de recibir y transportar el mineral almacenado en los piques de traspaso, provenientes del nivel de transporte intermedio y nivel de producción, hacia el exterior de la mina con dirección a la planta procesadora. Al igual que en el caso de los camiones, éstos son cargados mediante buzones.

Por razones de seguridad y debido al desgaste que sufren los equipos en las labores mineras, estos tienen mantenciones diarias programadas desde las 14:00 a las 16:00, esto quiere decir que a las 12:40 ya no puede ir a recoger mineral debido al tiempo que acarrea en dicha labor. Además una vez al mes los trenes se detienen durante 12 horas, para realizarles otro tipo de mantenciones más complejas.

<b>Características de los trenes</b>	
Capacidad	1380 [t]
Tiempo de ciclo promedio	80 [min]
Tiempo de mantención diaria	2 [hrs]
Horario de mantención diaria	14:00 - 16:00 [hrs]
Tiempo de mantención mensual	12 [hrs]

Tabla 16: Características de los trenes

### 2.3.3. Sistema de turnos

La mina en estudio se rige por un sistema de turnos, este sistema comprende 3 turnos diarios de 8 horas.

<b>Turno</b>	<b>Hora de inicio</b>	<b>Hora de termino</b>
Turno A	0:00	8:00
Turno B	8:00	16:00
Turno C	16:00	24:00

Tabla 17: Sistema de turnos de la faena en estudio

El cambio de turno conlleva pérdidas de tiempo operativo para algunos equipos, esto debido a que tanto los LHD como los camiones, detienen sus labores 45 minutos antes del cambio y comienzan a trabajar 45 minutos después que comienza el turno.

<b>Equipo</b>	<b>Tiempo perdido por cambio de turno</b>	<b>Pérdida diaria</b>
LHD	90 [min]	4.5 [hrs]
Camión	90 [min]	4.5 [hrs]

Tabla 18: Pérdida de tiempo operacional debido a los cambios de turno

#### 2.3.4. Tasa de extracción

Cada punto de extracción, tiene un límite de producción diario, el cual está directamente relacionado con la tasa o velocidad de extracción del punto y del área. A su vez si agrupamos los puntos de extracción por calle, tenemos que cada calle tiene un valor máximo de producción diaria.

<b>CALLE</b>	<b>PRODUCCIÓN DIARIA[t]</b>
6	1794
7	4436
8	6890
9	7750
10	8383
11	10984
12	7816
13	8314
14	7707
15	5858
16	3382
17	3486
18	4494
19	2317
20	2746
7/8-4	4342
Total	90699

Tabla 19: Límite de producción diaria por calle de la faena en estudio

### 3. DESARROLLO

El trabajo se dividirá en 3 etapas, las cuales buscan lograr objetivos específicos, que serán necesarios para obtener resultados finales confiables y que representen el sistema minero en estudio.

- **Desarrollar el modelo conceptual:** El modelo conceptual sirve como plano para levantar los procesos a modelar, mencionará el objetivo que se busca, entregando los límites del modelo, las restricciones que contendrá, los criterios que utilizará, además de los parámetros que considerará. Se definirán los elementos que compondrán el modelo desde un punto de vista operativo.

EL modelo conceptual constará de los siguientes elementos:

- Límite de batería
  - Elementos principales
  - Criterios físicos
  - Criterios de operación
  - Parámetros de entrada (que definen comportamiento)
  - Variables de salida (que miden el rendimiento)
- 
- **Implementar modelo de simulación:** En esta etapa se realizará la verificación y validación del modelo, La verificación consiste en comprobar que el modelo y el programa se comporten como se espera, es decir determinar si el modelo representa de forma precisa la descripción conceptual y las especificaciones del desarrollador, para esto se observa el desempeño de los algoritmos y la coherencia de los resultados. El proceso de validación permite determinar 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.
  - **Simulación y análisis de resultados:** Se procede a simular el sistema minero, y a analizar las vulnerabilidades y oportunidades encontradas, para finalmente interpretar los resultados.

### 3.1. Desarrollo del modelo conceptual

Antes de comenzar a codificar el modelo de simulación, se debe confeccionar un modelo conceptual. Éste servirá como guía de construcción para levantar los procesos a modelar. En esta etapa se definirán los elementos que componen un modelo de simulación de evento discreto (SED) desde un punto de vista operativo, con un nivel de detalle que permita al codificador construir el modelo en un software.

#### 3.1.1. Límite de batería

El modelo comenzará en la extracción de mineral en los puntos de extracción mediante LHD, su vaciado hacia el nivel de transporte intermedio, transporte y vaciado hacia el nivel de transporte principal mediante camiones y terminará con la conducción del mineral desde los piques de traspaso que llegan al nivel de transporte principal hasta la planta procesadora mediante trenes.

#### 3.1.2. Elementos principales

Existen elementos fundamentales a definir al momento de realizar la simulación en Promodel.

##### 3.1.2.1. Entidades

- Entidades reales:
  - Mineral: La entidad mineral, equivalente a una baldada de lhd (7,5 toneladas de minera), se mueve dentro del sistema desde la calle productiva, hasta la planta procesadora.
- Entidades virtuales:
  - Nuevo día: El objetivo de esta entidad es avisar al modelo que ha finalizado el día y por lo tanto es posible seguir extrayendo mineral de los puntos de extracción cuando se ha alcanzado el límite máximo de extracción diario para ese punto.
  - Cambio de turno: Esta entidad avisa al modelo cuando se produce el cambio de turno, con el objetivo de detener el funcionamiento de los LHD y camiones 45 minutos antes y 45 minutos después del cambio.
  - Mantenimiento LHD: Esta entidad detiene al LHD durante el periodo de mantenimiento programado.
  - Mantenimiento Camión: Esta entidad detiene al camión durante el periodo de mantenimiento programado.
  - Demora LHD: Esta entidad detiene al LHD de sus labores durante el tiempo en que el equipo tiene fallas, es decir, mantenimientos no programados.
  - Demora camión: Esta entidad detiene al camión de sus labores durante el tiempo en que el equipo tiene fallas, es decir, mantenimientos no programados.
  - Mantención tren: Esta entidad detiene al camión durante el periodo de mantenimiento programado.

### 3.1.2.2. Locaciones

- Calles productivas: Esta locación representa al subconjunto de puntos de extracción de una determinada calle, que tienen la particularidad de vaciar el mineral a un mismo pique de vaciado. Se le asignaron nombres a estas locaciones con el objetivo de distinguir a que calle pertenece, y el pique al que le corresponde vaciar el mineral. Es decir la locación con el nombre Calle11\_2 representa al subconjunto de puntos de extracción de la calle 11 que vacía el mineral en el pique número 2.
  - La capacidad de esta locación debe ser la producción máxima diaria, esto es diferente para cada calle debido a que cada punto tiene distinta tasa de extracción.
  - Esta capacidad debe ser renovada diariamente.

<b>NOMBRE DE LA CALLE</b>	<b>CAPACIDAD [t]</b>
6	1794
7	4436
7/8-4	4342
8	6890
9-3	63
9-5	7687
10-1	893
10-3	378
10-5	7112
11-2	1332
11-4	9652
12-2	1458
12-4	6358
13-1	1151
13-2	252
13-4	6911
14-1	959
14-2	774
14-3	315
14-4	5659
15-1	1221
15-2	714
15-3	3923
16-1	1269
16-2	301
16-3	1812
17-1	1123
17-2	2363

18-1	1406
18-2	3088
19-1	2317
20-1	2746

Tabla 20: Capacidades de las locaciones calle en el modelo de simulación.

- Piques de traspaso: Los puntos de vaciado que se encuentran en el nivel de producción son locaciones del tipo cola, que obedecen la lógica FIFO (first in first out) esto quiere decir que la entidad que primero entra es la primera que sale. La capacidad de estas locaciones depende de si el pique conecta con el nivel de transporte intermedio o con el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>CAPACIDAD [ENTIDADES]</b>
TRANSPORTE INTERMEDIO	583
TRANSPORTE PRINCIPAL	1620

Tabla 21: Capacidad de los piques en el modelo de simulación.

- Piques principales de traspaso: Los puntos de vaciado que se encuentran en el nivel de transporte intermedio (piques principales) son locaciones tipo cola, que obedecen la lógica FIFO (first in first out) esto quiere decir que la entidad que primero entra es la primera que sale. La capacidad es igual para los cuatro piques principales.

<b>PIQUE</b>	<b>CAPACIDAD [ENTIDADES]</b>
PRINCIPAL	1620

Tabla 22: Capacidad de los piques principales en el modelo de simulación.

- Mantenimiento: A esta locación se dirigen los equipos cuando se encuentran en mantenimiento, en este lugar esperan el tiempo que dura la mantención antes de regresar a realizar sus labores correspondientes. No tiene restricciones de capacidad.
- Planta procesadora: A esta locación se les realiza el mantenimiento a los trenes, además de ser el destino final de la entidad mineral. No tiene restricciones de capacidad

### 3.1.2.3. Recursos

- LHD: Este recurso tiene la capacidad de transportar una entidad, no se considera la velocidad a la que transita este equipo, sino el tiempo promedio de ciclo, el cual es 2,5 minutos.
- Camión: Este recurso tiene la capacidad de transportar 8 entidades, no se considera la velocidad a la que transita este equipo, sino el tiempo promedio de ciclo, el cual es 8 minutos.



- Tren: Este recurso tiene la capacidad de transportar 184 entidades, no se considera la velocidad a la que transita este equipo, sino el tiempo promedio de ciclo, el cual es 80 minutos.

### 3.1.3. 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.

- Los piques de traspaso de mineral tienen una capacidad definida, y luego que este se llena los equipos no podrán seguir vaciando mineral a dicho pique.
- 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.
- Los LHD tiene durante el turno fallas las cuales implican una pérdida de tiempo operativo de 117 minutos, es decir durante este tiempo el equipo no puede operar.
- Los camiones tienen durante el turno fallas las cuales implican una pérdida de tiempo operativo de 87 minutos, es decir durante este tiempo el equipo no se encuentra operativo.
- Los trenes una vez al mes tienen un mantenimiento de 12 horas, durante este tiempo los equipos no podrán operar.
- Entre las 14:00 y las 16:00 de cada día, los trenes se encuentran en mantención y por ende no se encuentran en condiciones operativas.
- Todos los equipos de la mina al momento de realizar la operación de carguío, se cargan a máxima capacidad.

### 3.1.4. 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 continúa 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.
- En el caso del nivel de transporte intermedio, todos los camiones están facultados para buscar mineral a cualquiera de los piques que provienen del nivel de producción. La elección del equipo que se dirija a dicho pique será al azar y en caso de que los camiones estén ocupados, el primero que se encuentre disponible para realizar la labor.
- Los camiones inician el vaciado en el pique ppal1, luego se dirigen al ppal2, luego al ppal3 y por ultimo al ppal4. Se cambian de pique exclusivamente cuando este se haya llenado. Se utiliza este orden debido a que es preferible alternar de cruzado al momento de cambiar de llenado de pique, esto por la operatividad de los trenes en el nivel inferior.
- Los trenes en el nivel de transporte principal tienen 8 piques en total donde recoger el mineral, todos los trenes están facultados para acceder a cualquiera de estos piques, la única restricción al respecto es que no pueden acceder dos trenes al mismo cruzado.
- Para todos los equipos, si al momento de entrar en mantención se encuentran transportando mineral, primero deben descargar el mineral en el lugar que corresponda y luego dirigirse a mantenimiento.

### 3.1.5. 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.

### 3.1.6. 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.

### 3.1.7. 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.

## 3.2. Implementación del modelo de simulación

En la sección anterior se confeccionó el modelo conceptual del sistema en estudio, el cual contiene el nivel de detalle suficiente para que la persona que va a codificar el sistema, pueda construir un modelo en un software, utilizando lo anterior como una guía de construcción. La implementación se realizará en el software Promodel, el cual no fue desarrollado con fines mineros en particular por lo que cada proceso u operación minera que abarca este trabajo, será modelado a partir de las herramientas con que cuenta este programa, de manera que emule el comportamiento de estos en la realidad.

Los modelos de simulación por su envergadura y tiempo de desarrollo es conveniente generarlos por etapas. Lo anterior significa que se debe realizar un modelo con un nivel de detalle tal, que responda a las inquietudes básicas que se esperan del estudio. Luego en una etapa siguiente enriquecer el estudio generando un modelo con mayor nivel de detalle.

La idea es generar un modelo que contenga la operación con todas las interacciones posibles, pero estas incluidas de un modo simplificado. Luego en las siguientes etapas, se van implementando las restricciones y/o interacciones que son relevantes para el sistema en estudio. Una vez implementadas, se les agrega un mayor nivel de detalle, para hacer un modelo cada vez más acercado a la realidad. Es decir vamos a realizar acercamientos sucesivos hacia la realidad.

### 3.2.1. Implementación de los procesos

Los procesos y operaciones que ocurren al interior de la mina se modelarán en el software de la siguiente manera:

#### 3.2.1.1. Cambio de día

Los cambios de día son necesarios implementarlos debido a que los puntos de extracción y por ende las calles o sub-calles tienen una cantidad definida de mineral que es posible extraer cada día. Entonces se definió una entidad llamada nuevo día, cuya función es avisar que es posible volver a extraer el mineral diario correspondiente a cada punto de extracción.

Esto se logra mediante contadores definidos para cada punto que restringen la extracción, y al momento de llegar la entidad nuevo día estos contadores se vuelven cero lo que permite seguir extrayendo de dichas locaciones.

### 3.2.1.2. Carguío en los puntos de extracción

La mayoría de las calles tienen más de un punto de vaciado, los cuales son asignados para puntos de extracción específicos, por esto se dividió las calles en sub-calles las cuales son un grupo de puntos de extracción que vacían en un pique en común. Estos se implementó así con el objetivo de distinguir donde debe vaciar el LHD dependiendo de la sub-calle a la que concurra.

Nuestra entidad en el sistema es una baldada de LHD, es decir 7.5 toneladas de mineral, esta entidad es la que al llegar a una locación calle (o sub-calle en el caso de que la calle cuente con más de un pique de vaciado) se encarga de llamar al equipo para que la transporte al pique de traspaso correspondiente.

Para las calles que solo cuenten con un pique de vaciado, debe cumplirse que el pique correspondiente tenga capacidad para almacenar otra entidad y que la calle no haya alcanzado la producción diaria. En el caso de que la calle corresponda a 2 o más sub-calles, se enviara la entidad a la que cumpla con los dos requisitos anteriormente mencionados mediante el diagrama lógico mostrado en la ilustración 11.

En el caso que más de una sub-calle cumpla con los requisitos, la entidad se enviará a la misma locación que fue enviada por última vez, hasta que el pique se llene o se cumpla el límite de extracción diaria para esa sub-calle. Esto se logra creando un atributo para la entidad la cual deja grabado la ultima locación a la que fue enviada, con el fin de que analice primero a esa locación si cumple para recibirla nuevamente.

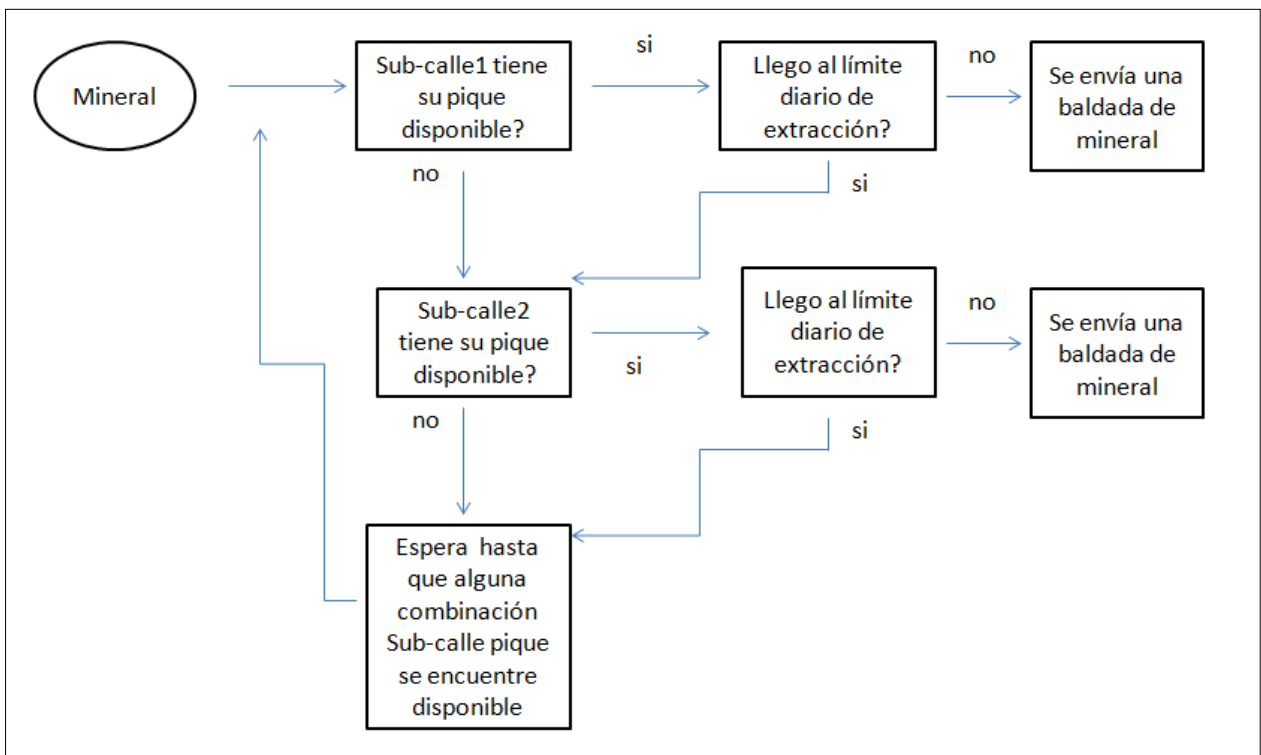


Figura 19: Diagrama lógico para enviar el mineral a las locaciones calle.

### 3.2.1.3. Transporte del mineral mediante LHD

Una vez que la entidad se encuentra en la calle (o sub-calle) correspondiente, esta tiene que llamar al LHD perteneciente a dicha calle. Previo a llamarlo, la entidad debe verificar que el sistema no esté en cambio de turno y que el equipo no se encuentre en falla o mantención. Luego de haberlo llamado el equipo transportara a la entidad desde una calle dada, al pique de vaciado correspondiente para ésta.

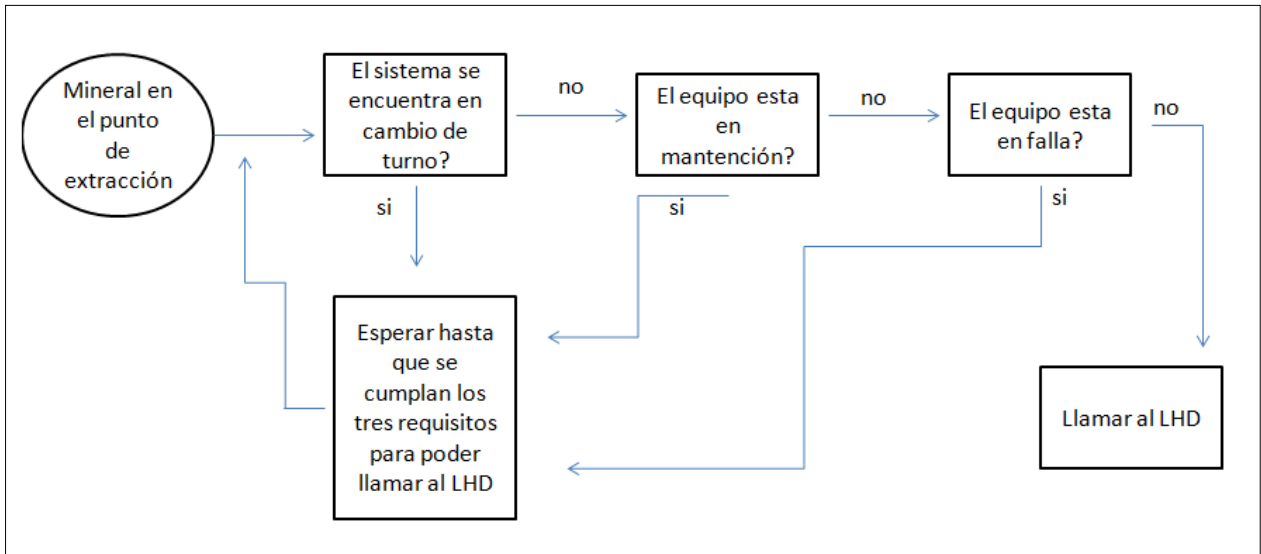


Figura 20: Diagrama lógico para llamar al recurso LHD desde los puntos de vaciado.

### 3.2.1.4. Mantención, falla y cambio de turno para el LHD

Para modelar estos eventos que determinan el funcionamiento de los recursos LHD, se creó una variable binaria para cada uno de ellos, las que deben verificarse antes de que la entidad pueda llamar al equipo. Para activar estas variables se utilizan entidades artificiales, cuya función es llegar cada cierto intervalo de tiempo y activarlas durante un cierto periodo de tiempo.

Las mantenciones de los LHD se activan siempre 45 minutos después del cambio de turno, es decir al momento de comenzar a operar el equipo. Esto fue tomado como supuesto ya que son actividades programadas con antelación.

Para las fallas en el equipo es distinto ya que en la realidad estas pueden ocurrir en cualquier momento del turno, para reproducir este hecho se programa que la entidad que activa este evento espera un tiempo al azar, el que tiene una distribución uniforme entre 0 y la duración del turno menos el tiempo que dura el equipo en falla, luego de esperar este tiempo activa la variable falla y detiene al LHD. En otras palabras la activación de la variable se puede producir en el instante en que empieza a operar el equipo o 117 minutos (tiempo que esta el equipo en falla) antes que se acabe el turno.

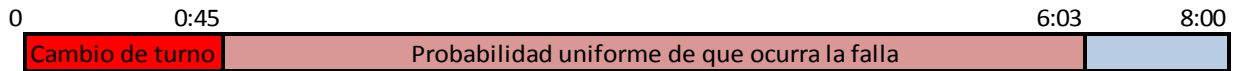


Figura 21: Distribución de probabilidad de ocurrencia de falla para LHD.

### 3.2.1.5. Viaje y tiempo de ciclo de los LHD

Se crea una red de caminos que conecta a la sub-calle con los piques de traspaso correspondientes, como se muestra en la ilustración 14. A cada segmento de la red se le asigna un tiempo, y el LHD se tardará ese tiempo en cruzar por ese segmento. Así se impondrá un determinado tiempo al recorrido realizado por el equipo.

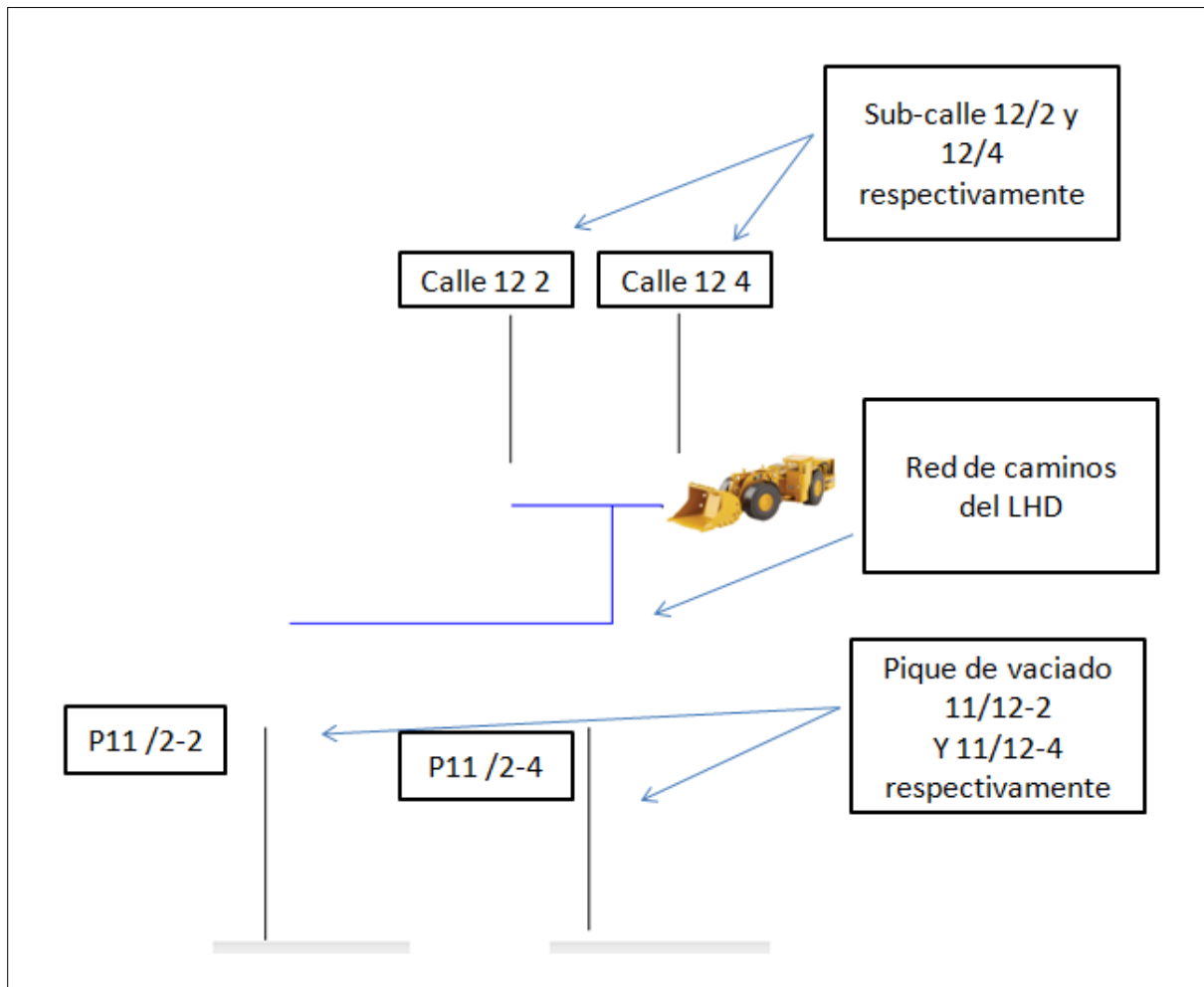


Figura 22: Diagrama del nivel de producción.

### 3.2.1.6. Pique de traspaso desde nivel de producción al nivel de transporte intermedio

Como se observa en la ilustración 14, los puntos de vaciado se observan como líneas verticales en el modelo, las que corresponden a colas que tienen capacidad para 77 entidades (583 toneladas). A medida que van entrando entidades esta locación las agrupa en pack de 8 ya que los camiones tienen capacidad de 60 toneladas y cada entidad equivale a 7.5 toneladas. Cuando se forma el grupo este es el encargado de llamar a un camión, en este caso no debe ser un equipo en particular el que la recoja, sino el primero que esté disponible.

### 3.2.1.7. Viaje y tiempo de ciclo de los camiones

Al igual que para los equipos LHD que transitan en el nivel de producción, se creó una red de caminos para los camiones, la que conecta cada uno de los piques de traspaso que llegan al nivel de transporte intermedio, con los piques principales que llegan al nivel de transporte principal. Cada segmento de esta red tiene tiempos asociados, que son responsables de los tiempos de ciclo de los equipos.

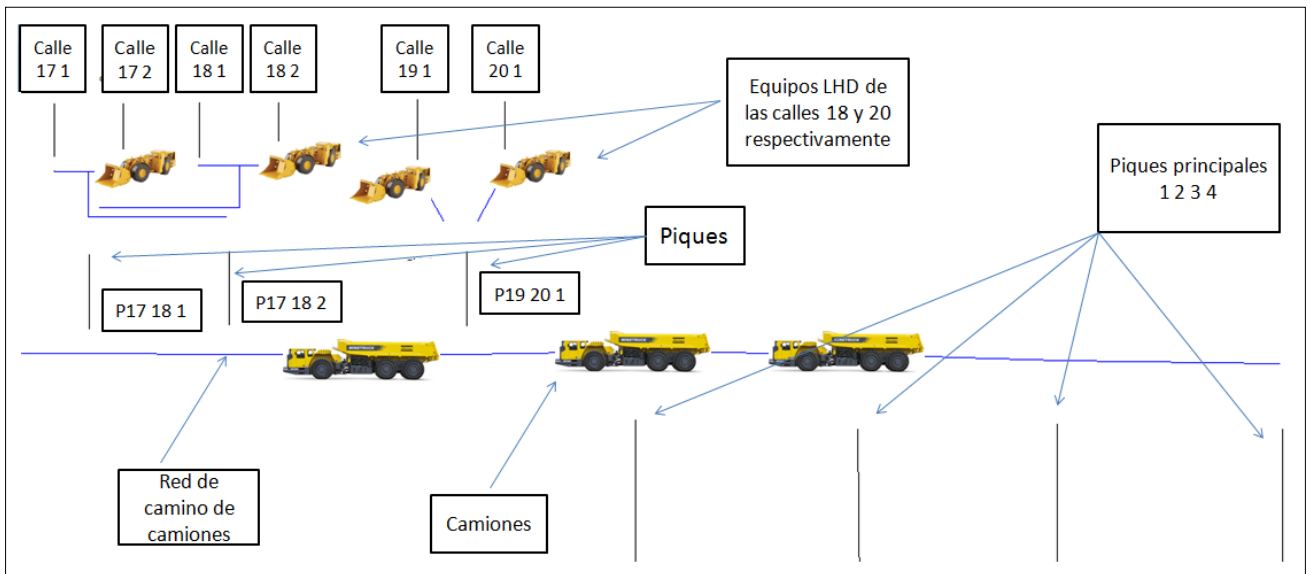


Figura 23: Diagrama del nivel de producción y transporte intermedio.

### 3.2.1.8. Mantenimiento y falla de camiones

Para el caso de los camiones este evento se modeló de manera distinta, debido a que la implementación de variables binarias para los camiones, fracasó a las pruebas visuales y también en los resultados obtenidos, principalmente se debió a que la demanda por camiones, al ser tan grande, produce una especie de cola en las labores de los equipos, esto quiere decir que los camiones tienen entidades pendientes aun cuando estén transportando ya a una de ellas. Lo anterior genera que al activarse la variable mantenimiento o falla, el camión no la respete pues ya ha sido pedido por el mineral con anterioridad.

Para poder modelar estos eventos, que son de gran relevancia en el estudio, se crearon dos locaciones anexas, las que están conectadas a la red de camino de los camiones, además se

crearon dos entidades nuevas (falla y mantenimiento) que llegarán a las nuevas locaciones dispuestas. Para lograr la condición de falla de un equipo se programó en el software que llegue esta entidad a la locación correspondiente a las fallas, y que solicite un camión con prioridad superior a la prioridad con que lo hace el mineral en los piques de traspaso. Con esto se obliga al equipo a recoger esta identidad artificial durante el tiempo que dura la falla, emulando un tiempo de mantenimiento. Igualmente se hace con las mantenciones, con la diferencia que la entidad mantenimiento llega a la locación destinada a las mantenciones y el tiempo que toma este proceso corresponde al tiempo de mantenimiento.

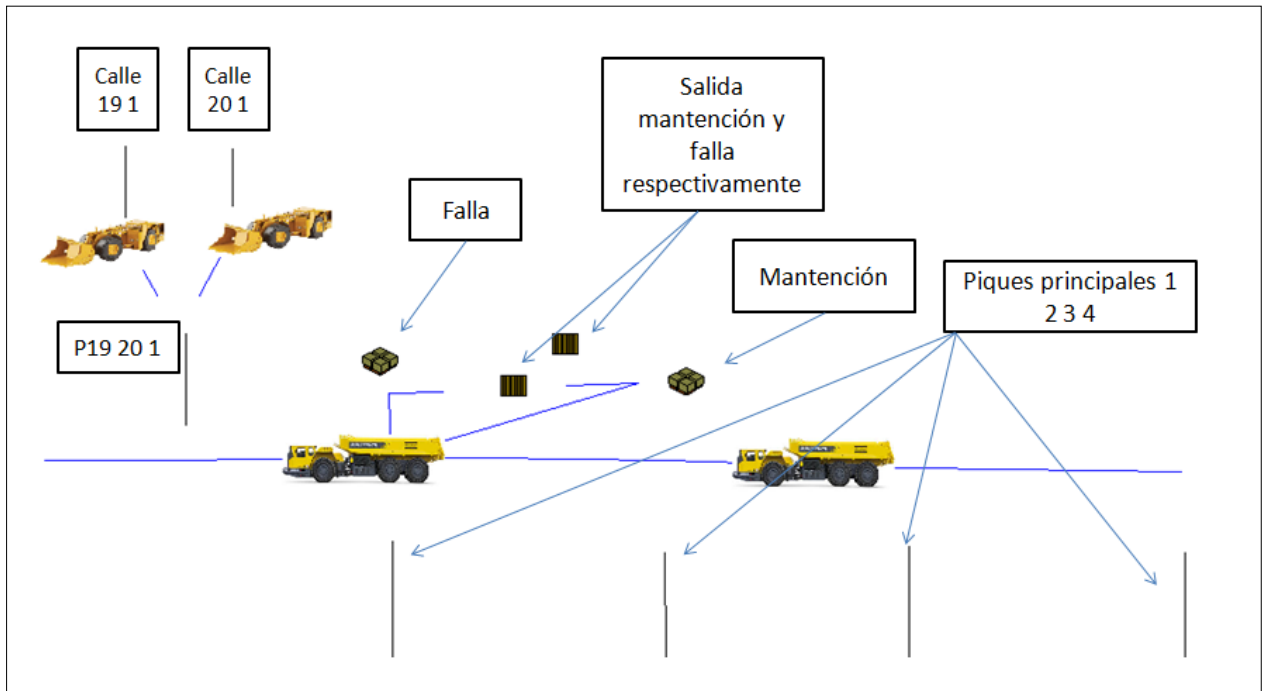


Figura 24: Diagrama de locaciones mantenimiento y falla para el nivel de transporte intermedio.

Las mantenciones para los camiones ocurren siempre al momento en que empieza a operar el equipo, es decir 45 minutos después de comenzado el turno. Supuesto que se toma dado que esta operación es visualizada con antelación. En el caso de las fallas estas funcionan de la misma forma que las fallas de los LHD, es decir llega la entidad falla cuando empieza a operar el equipo pero no lo llama de manera inmediata sino que espera un tiempo el que tiene una probabilidad uniforme entre 0 y el fin de turno menos el tiempo de falla del camión.



Figura 25: Distribución de probabilidad de ocurrencia de falla para camiones.

### 3.2.1.9. Cambio de turno para los camiones



Para lograr que el equipo no opere durante los cambios de turno, tampoco fue posible implementar una variable binaria como en el caso de los LHD, debido a la gran demanda por camiones de parte de los piques explicada anteriormente.

Incluir otra entidad cambio de turno y realizar el mismo ejercicio que para las fallas y mantenciones solo produciría una saturación del sistema en el nivel de los camiones, debido a que crearía conflictos de prioridades entre fallas, mantenciones y cambios de turno. A diferencia de las fallas y mantenciones el evento cambio de turno ocurre a diario y siempre en los mismos horarios, esta cualidad permitió utilizar la herramienta itinerario de Promodel, que permite definir horarios de descanso durante el día, en los que el equipo o locación no está habilitado para operar. Se definieron los horarios de cambio de turno como descansos en el itinerario, estos tienen mayor prioridad que las demás labores que pueda estar realizando el camión, por ende el equipo no trabajaran durante el cambio de turno.

#### 3.2.1.10. Piques principales

Estas locaciones al igual que todos los piques de traspaso, se representan en forma de línea vertical en el software, este elemento corresponde a una cola que tiene capacidad para 27 pack de entidades, recordemos que el camión recibe 8 entidades (60 toneladas) las que no se vuelven a separar, estos 27 pack de entidades hacen un total de 1620 toneladas correspondientes a la capacidad de estos puntos de vaciado. Al momento de ingresar 23 packs esta infraestructura las agrupa nuevamente, formando un nuevo pack de entidades con un peso total de 1380 toneladas, esta cantidad es la capacidad del tren que debe transportar a este nuevo grupo. Una vez hecho esto, el paquete creado procede a llamar al tren, no hay restricciones con respecto a que tren llamar, simplemente se le asignará la labor al primero que esté disponible.

#### 3.2.1.11. Piques que conectan el nivel de producción con nivel de transporte principal

De la misma forma que los otros piques de traspaso antes mencionados, estos se visualizan como líneas verticales en el modelo y corresponden a colas que tienen una capacidad de 216 entidades, las cuales hacen un tonelaje total de 1620 toneladas, equivalentes a la capacidad de estas infraestructuras. En este lugar se realiza el agrupamiento de 184 de estas entidades, generando un paquete de 1380 toneladas, equivalentes a la capacidad de transporte del tren. Luego esto, este pack procede a llamar a cualquiera de los trenes, realizando el trabajo aquel que primero se encuentre disponible.

#### 3.2.1.12. Viaje y tiempo de ciclo de los trenes

De igual forma que los recursos detallados anteriormente, se dispuso una red de caminos que conecta todos los piques que llegan al nivel de transporte principal con la locación de salida de las entidades (asociada conceptualmente con la planta procesadora). Cada segmento de la red de caminos tiene un tiempo asociado los cuales son configurados para simular el tiempo de ciclo del tren.

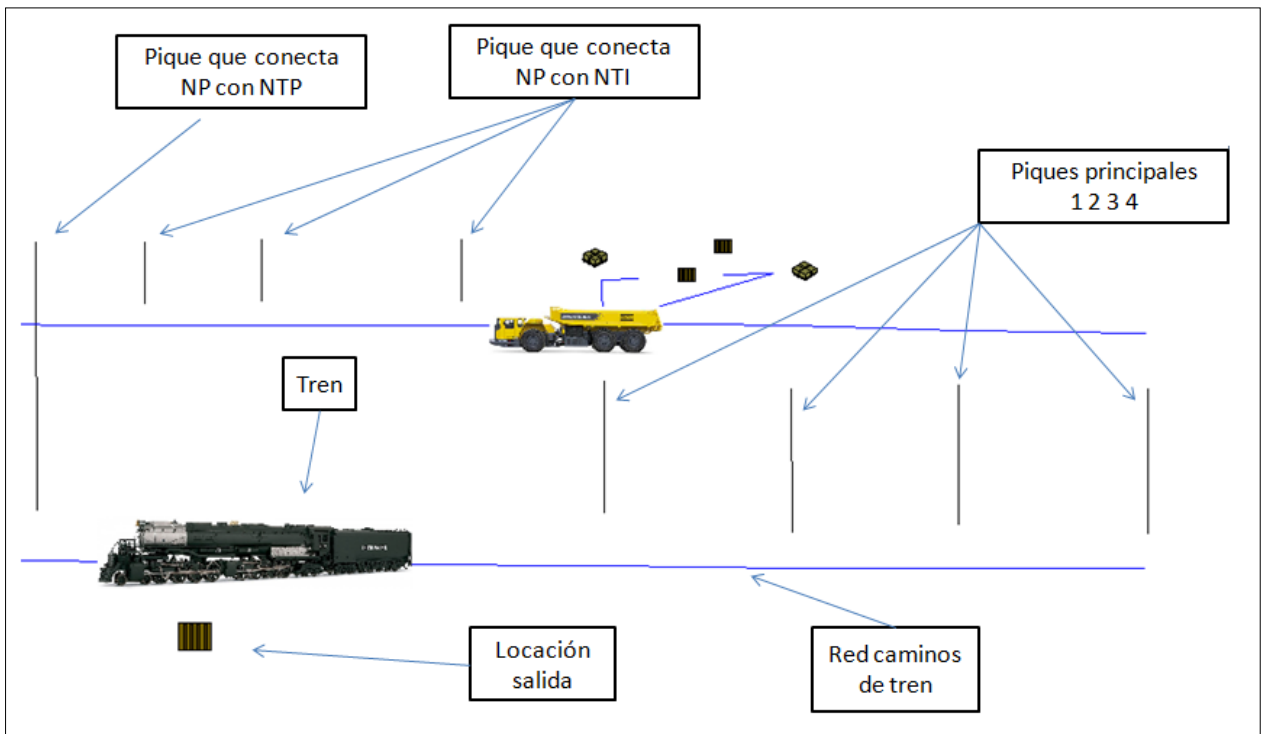


Figura 26: Diagrama del nivel de transporte principal y transporte intermedio.

### 3.2.1.13. Funcionamiento de mantenciones para el tren

Existen dos mantenciones para estos recursos, una que ocurre diariamente durante entre los horarios 14:00 y 16:00, y una que ocurre solo una vez al mes y tiene una duración de 12 horas. Para la primera se decidió utilizar la herramienta itinerario debido a que ocurre todos los días a la misma hora, por esto se definió como horario de descanso para el tren desde las 12:40 a las 16:00, el hecho de que se defina este evento 1:20 antes de la hora de mantención es producto del tiempo de ciclo de este equipo, ya que si el tren fuese llamado a las 12:45 se desocuparía a las 16:05 y no podría respetar la mantención. Para la mantención que ocurre una vez al mes se creó una entidad llamada mantención tren, la que llega a la locación de salida y llama al tren durante 12 horas, simulando esta mantención.

### 3.2.2. Modelos

Como fue dicho anteriormente, debido a la dimensión y complejidad del sistema, la mejor manera de abordar el problema es hacer un acercamiento en etapas hacia el modelo final al que se quiere llegar. La estrategia mencionada plantea agregar sucesivamente detalles al modelo hasta lograr acercarse tanto como se quiera a la realidad, al agregar procesos o restricciones en etapas se hace más fácil poder comprobar que efectivamente se reproduzca lo que fue programado en el software, además de facilitar la detección de errores o incoherencias.

A continuación se describirán los modelos que fueron creados antes de llegar al modelo final.

### 3.2.2.1. Modelo A

Esta fue la primera aproximación hacia el sistema minero en estudio, solo se simula el comportamiento del nivel de producción y transporte intermedio. Como se aprecia en la ilustración 19, el modelo cuenta con una calle productiva en la que todos los puntos de extracción vacían el mineral hacia el mismo pique de traspaso, es decir no se divide en Sub-calles. Un equipo LHD recoge el mineral y lo lleva hacia el pique de traspaso el cual se conecta con el nivel del transporte intermedio, aquí lo recibe un camión que lo conduce hacia una salida que en este caso es el pique de traspaso hacia el nivel de transporte principal.

Se implementó:

- Equipos LHD y camión.
- Redes de caminos para los equipos.
- Tiempos de ciclo para los equipos.
- Capacidades para el pique de traspaso.

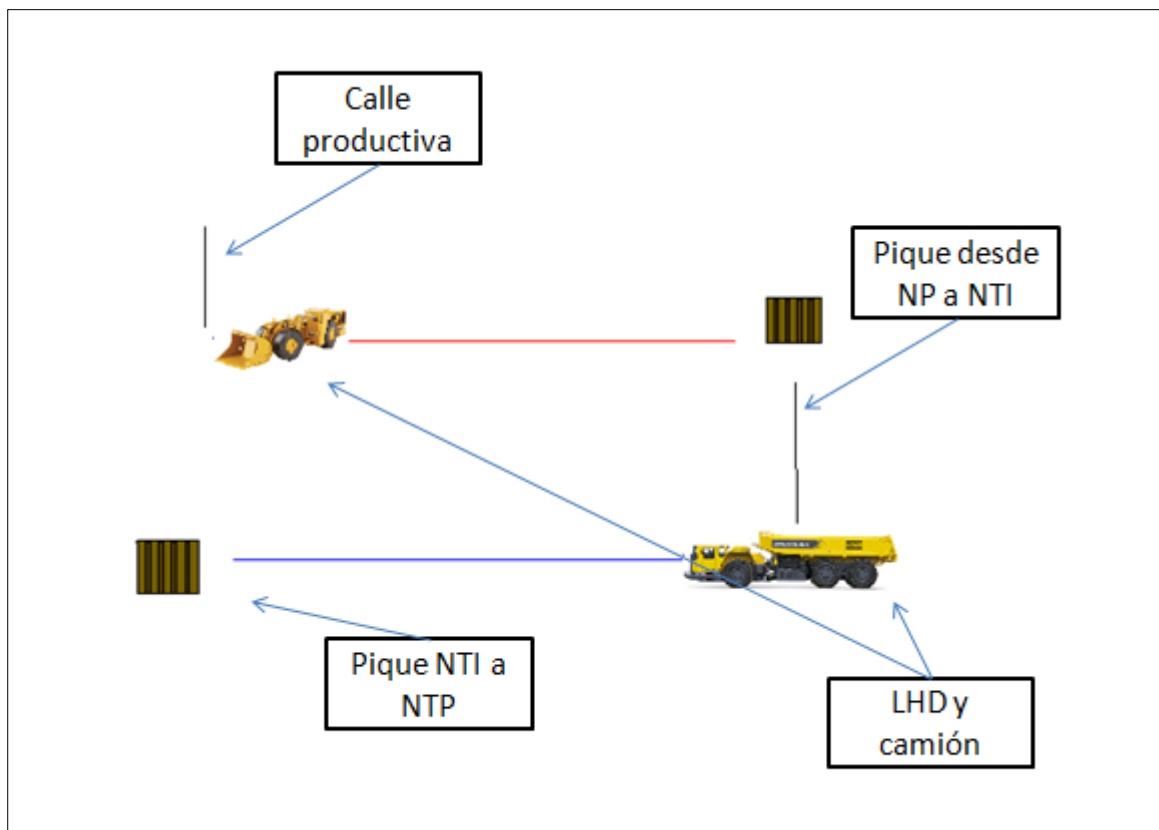


Figura 27: Diagrama del modelo A.

### 3.2.2.2. Modelo B

El siguiente paso que se dio fue agregar el nivel de transporte principal, entonces ahora el camión vacía el mineral en el pique de traspaso que llega hacia el NTP, para luego ser recolectado por el tren y llevado hacia la salida.

Se implementó:

- Nivel de transporte principal.
- Recurso tren.
- Tiempo de ciclo del recurso tren.
- El mineral es agrupado en los piques de acuerdo a la capacidad del equipo que va a retirarlo.
- Contadores y medidores de nivel para verificar las operaciones.

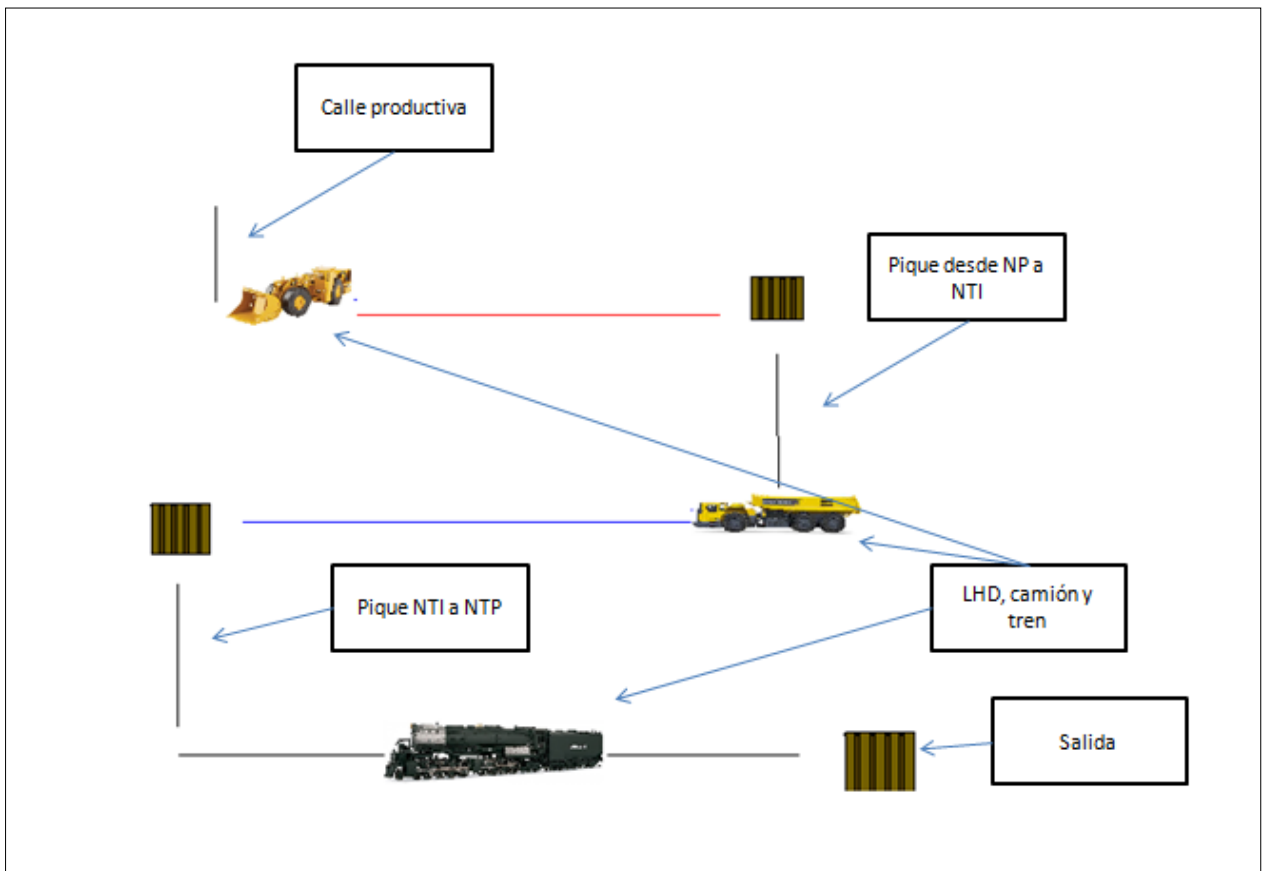


Figura 28: Diagrama del modelo B.

### 3.2.2.3. Modelo C

Como se aprecia en la ilustración 21, en este modelo se agregaron mas calles en el nivel de producción, se implementaron las fallas y mantenencias para los camiones y LHD, además se construyó con la flota oficial de equipos correspondiente a 4 camiones y 2 trenes.

Se implementó:

- Varias calles productivas.
- Flota oficial de equipos.
- Nivel de transporte intermedio para múltiples camiones.
- Nivel de transporte principal para múltiples trenes.
- Fallas para los camiones y LHD.
- Mantenencias para camiones y LHD.
- Cambio de turno para LHD.

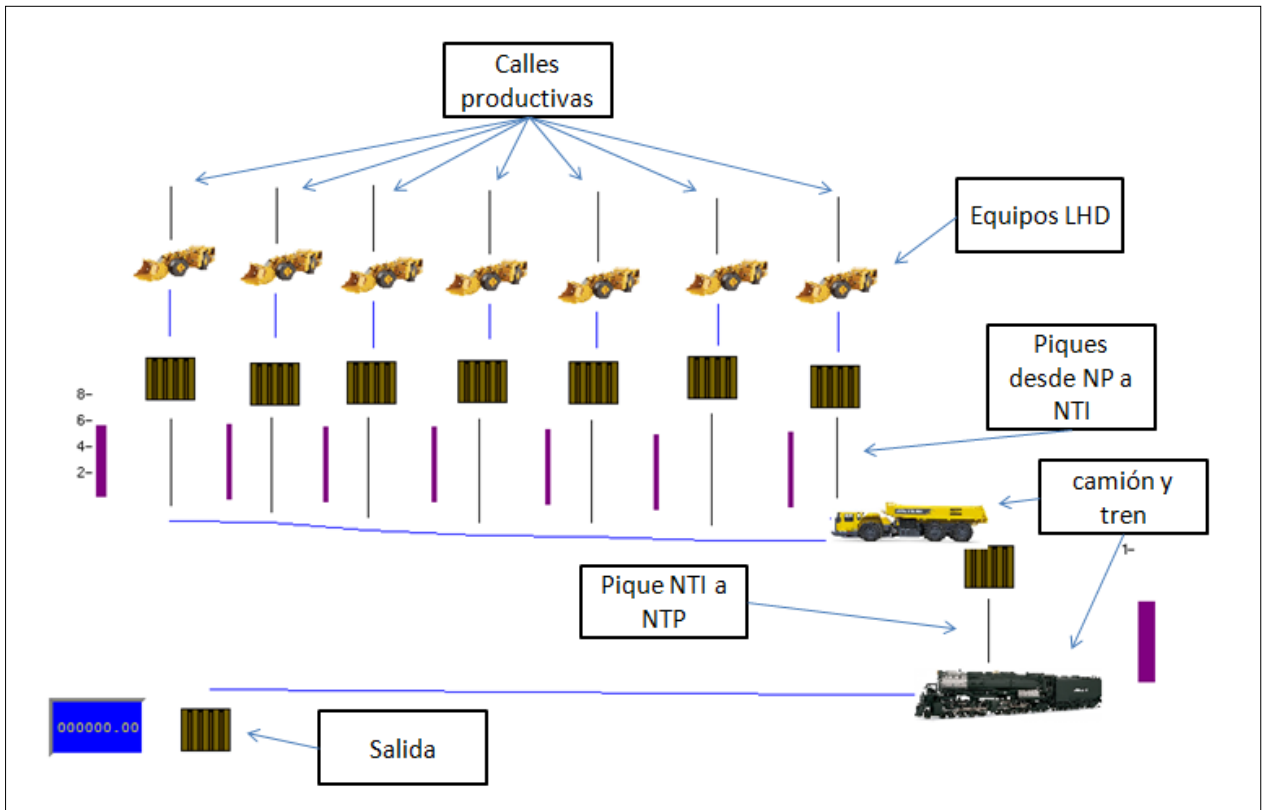


Figura 29: Diagrama del modelo C.

### 3.2.2.4. Modelo D

La parte más compleja del código de programación fue la implementada en el modelo D, en este se codificaron las múltiples condiciones y criterios que se le imponen a las entidades para que lleguen a una determinada sub-calle. Como se observa en la ilustración 22, se tiene una calle productiva la cual se divide en 3 sub-calles, cada sub-calle tiene asociado un único y específico punto de vaciado en el que el LHD debe depositar el mineral.

Se implementó:

- Calle productiva dividida en sub-calles.
- Lógica y código que permite a una locación auxiliar discernir si debe y a que sub-calle enviar el mineral para que el LHD lo recoja.
- LHD con distintas rutas.
- Cambio de turno para camiones y LHD
- Mantenciones para trenes.

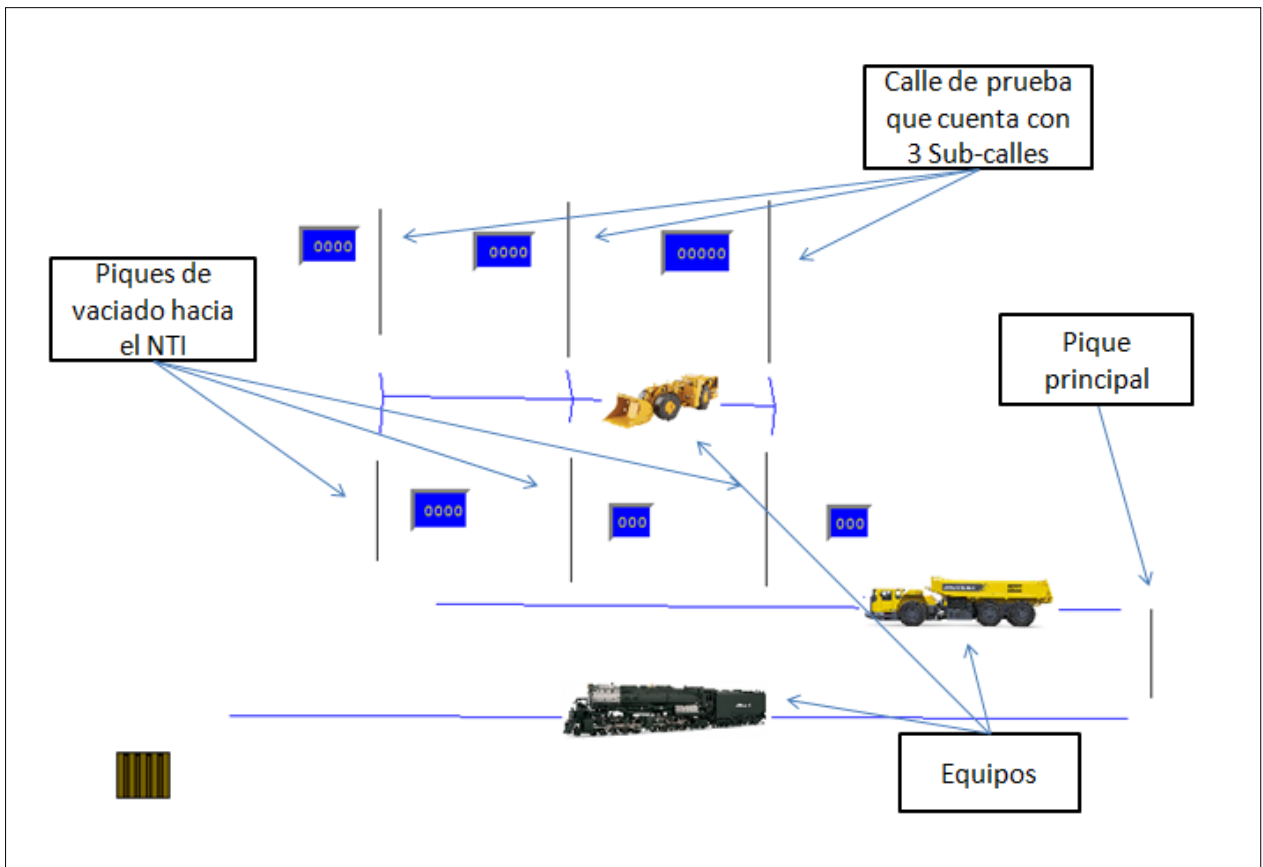


Figura 30: Diagrama del modelo D.

El modelo final, el cual es demasiado grande como para poder mostrarlo en una imagen, consiste en implementar todo lo aplicado en los modelos anteriores, a las múltiples calles productivas del

sistema minero en estudio. Cumpliendo finalmente con todos los alcances impuestos desde el comienzo del estudio.

### 3.2.3. Verificación

El proceso de verificación se llevo a cabo en primer lugar por una inspección visual, esta consistió en observar el contenido de animación del software y cerciorarse que cada componente y proceso ocurra de la manera en que fue programado y en los tiempos dispuestos. Esto se realizo tanto para el modelo final como para los modelos previos, dando resultados positivos en cada uno de ellos. Además gracias a los reportes entregados por el programa se pudo medir y cuantificar ciertos indicadores que permiten cerciorarnos de que los procesos estén ocurriendo y que estén ocurriendo a tiempo. A continuación se detallan las verificaciones que se hicieron.

#### 3.2.3.1. Horas agendadas para cada equipo

Estas corresponden a las horas de simulación menos las horas en que el equipo no se encuentra operativo por itinerario, recordar que se realizo itinerario tanto para los cambios de turno de los camiones como las mantenciones diarias de los trenes. Los resultados fueron los siguientes:

<b>Recurso</b>	<b>Agenda [horas/mes]</b>	<b>Agenda [horas/día]</b>
LHD	744	24
Camión	604.5	19.5
Tren	640.67	20.7

Tabla 23: Horas agendadas para cada equipo del modelo.

Los resultados en la tabla son correctos para cada equipo, el LHD tiene 744 horas correspondientes a las 24 horas del día multiplicadas por los 31 días del mes. Las 604.5 horas de los camiones corresponden a las 744 horas de simulación menos las 4.5 horas diarias correspondientes a los cambios de turno multiplicadas por los 31 días del mes. Con respecto a los trenes las 640.67 horas por agenda son las 744 horas del mes menos las mantenciones diarias de 12:40 a 16 horas. De lo anterior podemos concluir que tanto los cambio de turno para los camiones como las mantenciones diarias para los trenes están ocurriendo correctamente.

#### 3.2.3.2. Contador de entidades auxiliares

La cantidad de entidades auxiliares que abandonan el sistema nos permiten verificar que ciertos eventos estén ocurriendo en forma correcta.

<b>Entidad</b>	<b>Cantidad por mes</b>	<b>Cantidad por día</b>
Cambio de turno	93	3
Fallas LHD	93	3
Fallas camión	93	3
Nuevo día	31	1

Tabla 24: Salida de entidades auxiliares del modelo.

La entidad Nuevo día se puso en acción 31 veces debido a que fue simulado un mes con esa cantidad de días. La entidad Cambio de turno arrojó un valor de 93 ya que tenemos 3 turnos por día. Por último las fallas tanto de LHD como camiones al ser una por turno durante todo el mes dan como resultado 93 salidas del sistema. Con estos datos podemos evidenciar que estos procesos están ocurriendo la cantidad de veces que fueron solicitados por el programador.

### 3.2.3.3. Tiempo en operación

El tiempo promedio que estuvo en operación una entidad (dependiendo de la funcionalidad de esta) nos permite identificar si el proceso que debía detonar, se realizó durante el tiempo que debía ser. Las entidades que se muestran a continuación fueron implementadas para detener a ciertos recursos durante un periodo de tiempo, por esta razón el tiempo promedio que estuvieron en operación tiene directa relación con el tiempo en que fue detenido el equipo.

<b>Entidad</b>	<b>Tiempo promedio en operación [min]</b>
Cambio de turno	90.0
Falla LHD	251.7
Falla Camión	236.7
Mantenimiento Camión	240.6
Mantenimiento LHD	240.0
Mantenimiento tren	720.0

Tabla 25: Tiempo promedio de operación de entidades auxiliares.

La entidad cambio de turno debe detener al LHD durante 1.5 horas por lo que el tiempo en operación apreciado es adecuado, de igual forma ocurre con las mantenciones de los camiones y LHD, para ambos equipos este evento tiene una duración de 4 horas. La mantención del tren mostrada en la tabla corresponde a la ocurrida una vez al mes, esta tiene programada una duración de 12 horas, este hecho es concordante con los 720 minutos que está en operación esta entidad. Las fallas impuestas para los LHD tienen una duración de 117 minutos, el tiempo observado en la tabla corresponde al tiempo que el equipo se encuentra en estado de falla sumado del tiempo que la entidad espera en promedio para detonar este evento, el cual corresponde a 135 minutos, dando un total de 252 minutos lo que concuerda con el resultado obtenido. Del mismo modo ocurre con las fallas de los camiones con la diferencia que la falla tiene una duración de 87 minutos y el tiempo de espera promedio para detonar este suceso son 150 minutos, dando un total de 237 minutos el cual se ajusta muy bien al que se presenta en los resultados de la simulación.



### 3.2.4. Validación

Para este proceso se tienen datos de la faena en estudio y además se cuenta con la experiencia de profesionales dedicados a la producción en minería subterránea, específicamente en la mina donde se realiza el estudio. Los resultados del modelo a evaluar para la validación serán las disponibilidades y utilizaciones de los equipos que se detallan en la tabla 10.

<b>Equipo</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Utilización</b>
LHD 6	72.59	53.16
LHD 7	72.59	53.01
LHD 8	72.59	53.79
LHD 9	72.32	44.06
LHD 10	72.32	58.28
LHD 11	72.32	65.92
LHD 12	72.32	67.26
LHD 13	72.32	68.52
LHD 14	72.32	71.57
LHD 15	72.59	69.19
LHD 16	72.32	67.4
LHD 17	72.59	60.72
LHD 18	72.59	59.8
LHD 19	72.59	36.2
LHD 20	72.59	37.03
LHD 784	72.59	71.95
Camiones	76.00	75.00
Trenes	84.00	65.00

Tabla 26: Disponibilidades y utilización para los equipos del modelo.

Dado los resultados obtenidos de la simulación del sistema minero en estudio y con la aprobación de profesionales expertos y dedicados a esta disciplina. Se da por validado el modelo.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Caso Base

El caso base corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones actuales de operación en la faena en estudio. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

Equipos	Cantidad
LHD	16
Camión	4
Tren	2

Tabla 27: Cantidad de equipos caso base

- Tiempos de fallas de los equipos.

Fallas	Tiempo [min]
LHD	117
Camión	87

Tabla 28: Tiempos de falla de equipos caso base

#### 4.1.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso base y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

Réplica (producción)	[Kton/mes]	[Kton/día]
Máximo	918.6	29.7
Mínimo	898.7	28.9
Promedio	908.4	29.3

Tabla 29: Producción mensual y diaria del caso base

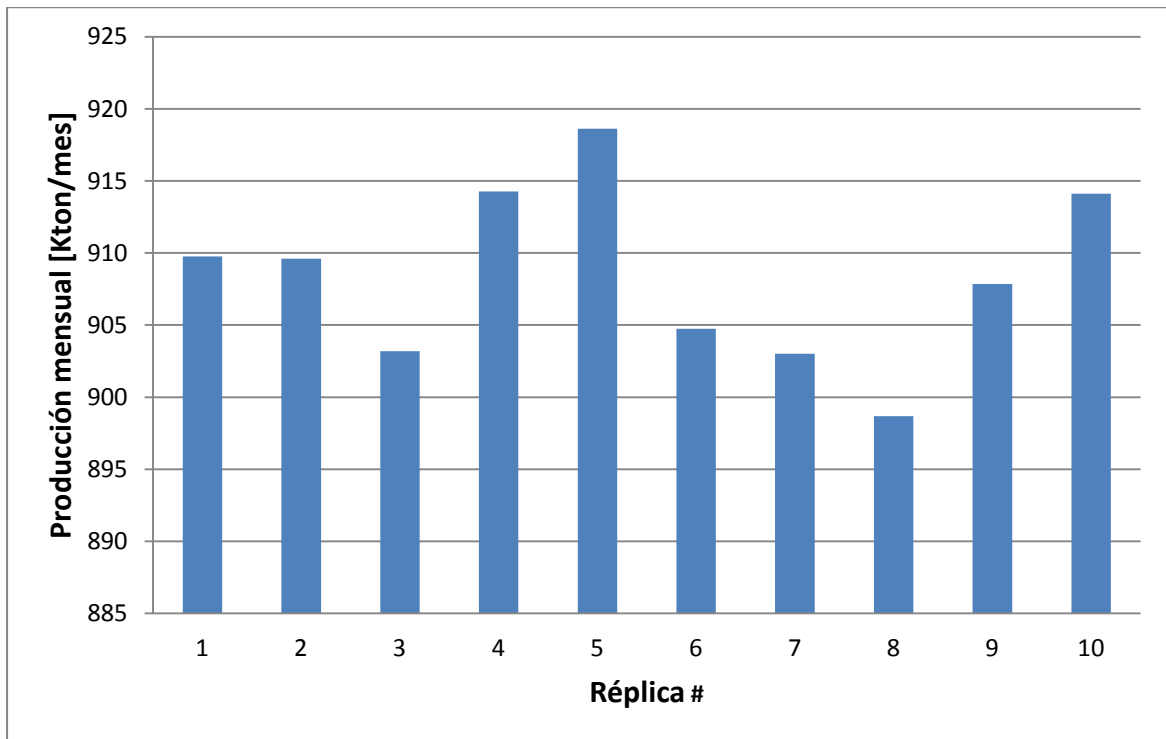


Figura 31: Producción mensual caso base

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

<b>Producción diaria</b>	<b>[Kton]</b>
Mínimo	15.9
Máximo	32.9
Promedio	29.3

Tabla 30: Estadística de la producción diaria promedio caso base

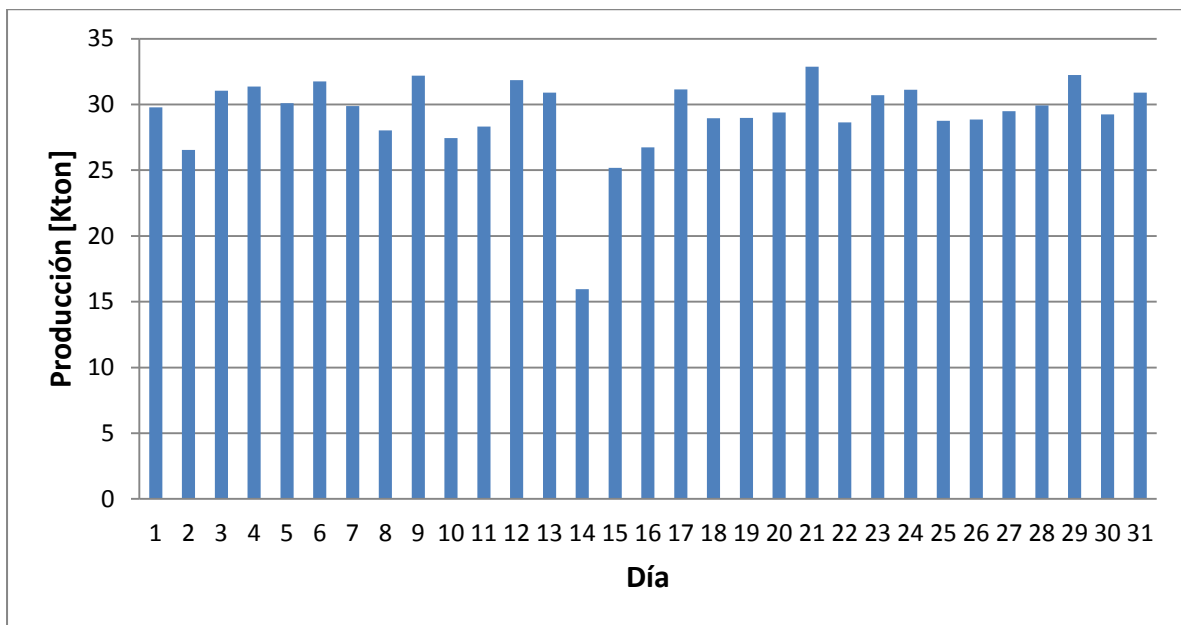


Figura 32: Producción diaria caso base

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

Equipo	Disponibilidad %	Utilización %
LHD 6	72.6	53.2
LHD 7	72.6	53.0
LHD 8	72.6	53.8
LHD 9	72.3	44.0
LHD 10	72.3	58.3
LHD 11	72.3	65.9
LHD 12	72.3	67.3
LHD 13	72.3	68.5
LHD 14	72.3	71.6
LHD 15	72.6	69.2
LHD 16	72.3	67.4
LHD 17	72.6	60.7
LHD 18	72.6	59.8
LHD 19	72.6	36.2
LHD 20	72.6	37.0
LHD 784	72.6	72.0
Camiones	76.0	75.0
Trenes	84.0	65.0

Tabla 31: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso base

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 16 y 17.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	77.2	22.8
P7	-	75.3	24.7
P8	-	75.1	24.9
P9/10_3	-	100.0	-
P9/10_5	-	65.3	34.7
P10_1	-	98.9	0.9
P11/12_2	-	94.9	5.0
P11/12_4	-	77.0	23.0
P13/14_1	-	72.1	27.5
P13/14_2	1.2	86.3	12.6
P13/14_4	-	77.2	22.9
P14_3	14.5	85.5	-
P15/16_1	-	71.3	28.7
P15/16_2	1.7	86.3	12.1
P15/16_3	-	72.6	27.4
P17/18_1	-	62.8	37.0
P17/18_2	-	64.9	35.1
P19/20_1	-	60.2	39.8
P7/8_4	-	97.9	2.1

Tabla 32: Estado de los piques de traspaso caso base

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	79.8	20
PPAL2	-	79.8	19.9
PPAL3	-	80.1	19.8
PPAL4	-	80.5	19.2

Tabla 33: Estado de los piques de traspaso principales caso base

#### 4.1.2. Análisis

- Lo primero que nos percatamos al observar los resultados es que la producción está por debajo de lo planificado para el mes, se obtuvo una producción promedio de 29.3 [Kton/día], aproximadamente 10 [Kton/día] más bajo de lo que indica el plan minero.
- Se puede apreciar en el gráfico de la producción por día que no existen grandes diferencias a excepción del día 14 (en que se da la mínima producción de 16[Kton/día]) y 15. Esto es producto de la mantención que se le realiza a los trenes ese día la cual tiene una duración de 12 horas. Esto provoca el llenado de los piques de traspaso y el cese del trabajo de los equipos niveles arriba.
- Con respecto a las utilizations de los equipos, llama la atención la baja utilización de los LHD 19 y 20 (aproximadamente 37% para cada uno). Esto se debe a dos factores, primero a que el tonelaje admisible a extraer para esas calles es muy baja por lo que antes de las 24 horas ya han extraído todo lo permitido, y segundo a que las dos calles comparten un solo punto de vaciado lo que provoca que este pase gran parte del tiempo lleno (40% aproximadamente) y los LHD no puedan trabajar.
- La alta utilización de los camiones y el gran porcentaje de tiempo que pasan llenos los piques que llegan al nivel de transporte principal, nos hace ver que ahí existe un cuello de botella en el sistema en el nivel de transporte intermedio.
- Podemos apreciar que los piques principales tienen un porcentaje de su tiempo llenos que no es despreciable, pero cabe mencionar que por apreciación visual, esto se debe al elevado tiempo de viaje de los trenes, provocando que una vez que se llene el pique, pase gran cantidad de tiempo en estado lleno esperando a que llegue el tren

#### 4.2. Caso de estudio A: Equipos LHD con un 25% menos de tiempo de fallas.

El caso A corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones operacionales del caso base a excepción del tiempo de falla de los equipos LHD, el cual se ha reducido. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

Equipos	Cantidad
LHD	16
Camión	4
Tren	2

Tabla 34: Cantidad de equipos caso estudio A

- Tiempos de fallas de los equipos.

Fallas	Tiempo [min]
LHD	88
Camión	87

Tabla 35: Tiempo de falla de equipos caso estudio A

##### 4.2.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso A y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

Réplica (producción)	[Kton/mes]	[Kton/día]
Máximo	926.9	29.9
Mínimo	903.5	29.1
Promedio	917.4	29.6

Tabla 36: Producción mensual y diaria del caso estudio A

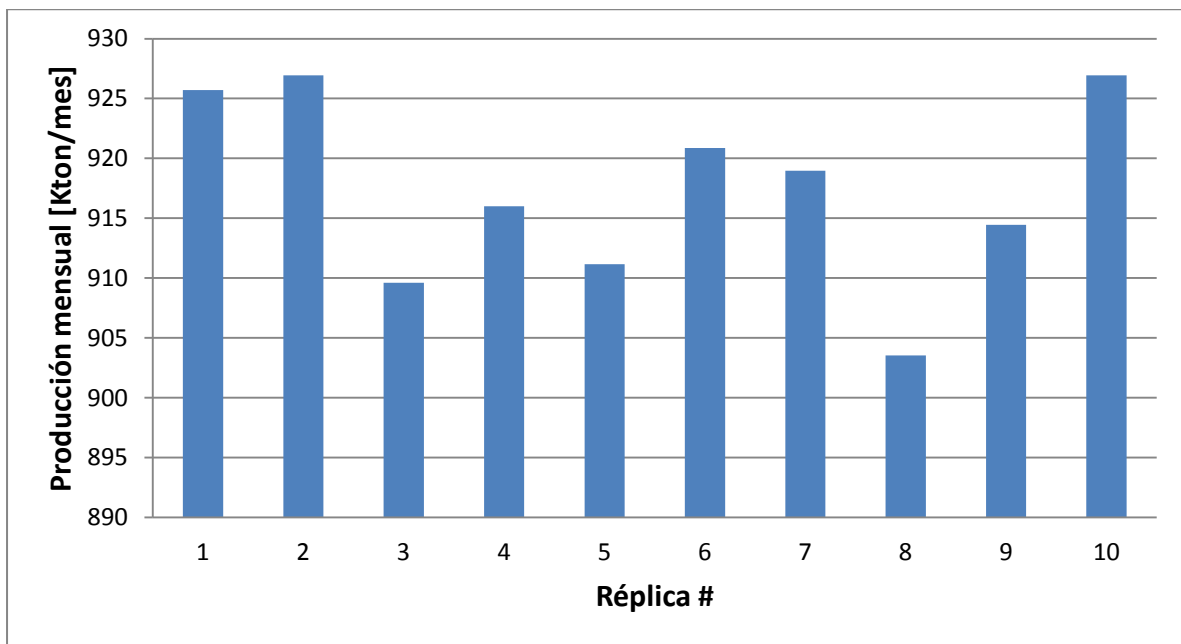


Figura 33: Producción mensual caso estudio A

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

<b>Producción diaria</b>	<b>[Kton/día]</b>
Mínimo	16.4
Máximo	33.5
Promedio	29.6

Tabla 37: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio A



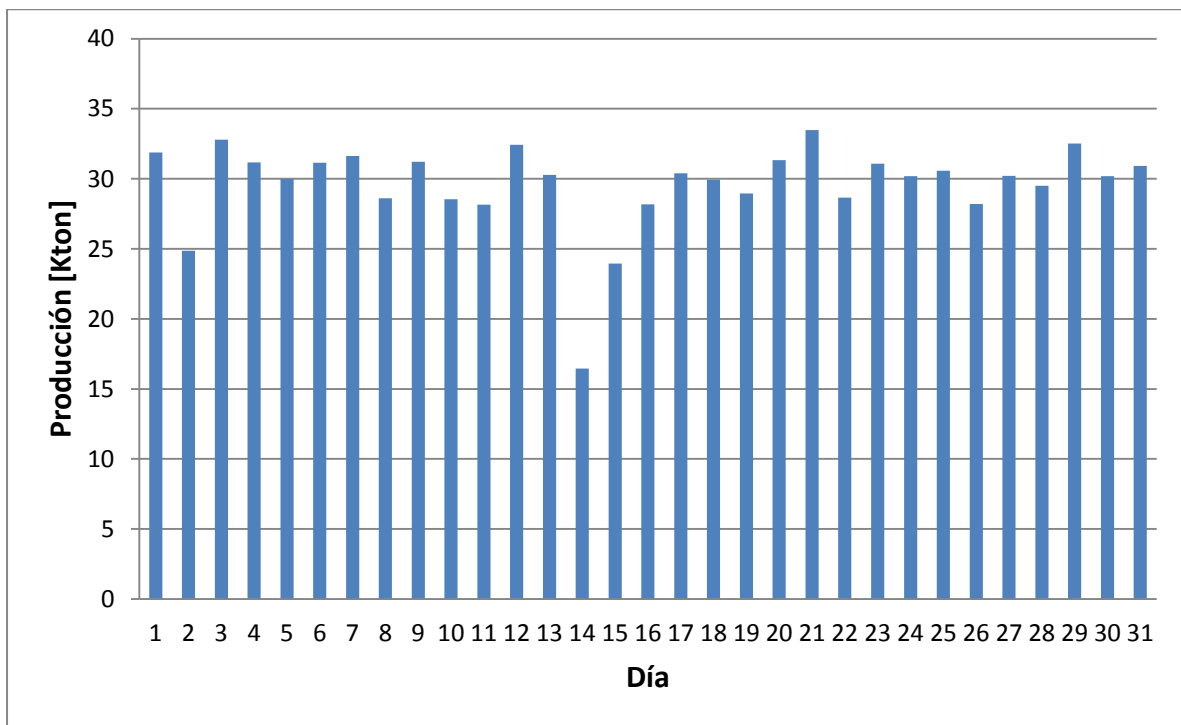


Figura 34: Producción diaria caso estudio A

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

Equipo	Disponibilidad %	Utilización %
LHD 6	77.9	49.0
LHD 7	77.9	49.0
LHD 8	77.9	48.8
LHD 9	77.6	38.9
LHD 10	77.6	54.4
LHD 11	77.6	63.4
LHD 12	77.6	65.6
LHD 13	77.6	65.5
LHD 14	77.6	70.6
LHD 15	77.9	67.2
LHD 16	77.6	64.2
LHD 17	77.9	56.0
LHD 18	77.9	55.7
LHD 19	77.9	32.1
LHD 20	77.9	32.6
LHD 784	77.9	68.3
Camiones	76.0	75.0
Trenes	84.0	65.0

Tabla 38: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio A

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 23 y 24.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	69.6	30.5
P7	-	67.7	32.4
P8	-	68.6	31.5
P9/10_3	-	99.9	-
P9/10_5	-	55.2	44.8
P10_1	-	99.1	-
P11/12_2	-	95.0	4.8
P11/12_4	-	68.9	31.1
P13/14_1	-	62.6	36.9
P13/14_2	2.1	82.5	15.4
P13/14_4	-	66.5	33.5
P14_3	11.9	88.2	-
P15/16_1	-	60.8	39.2
P15/16_2	1.6	83.8	14.7
P15/16_3	-	60.5	39.6
P17/18_1	-	52.5	47.5
P17/18_2	-	50.5	49.5
P19/20_1	-	51.2	48.8
P7/8_4	-	96.9	3.0

Tabla 39: Estado de los piques de traspaso caso estudio A

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	79.6	20.1
PPAL2	-	79.6	20.1
PPAL3	-	79.8	20.0
PPAL4	-	80.9	18.8

Tabla 40: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio A

#### 4.2.2. Análisis

- Al disminuir el tiempo de falla de los LHD podemos darnos cuenta que inmediatamente aumento la disponibilidad de estos equipos, cosa que era de esperarse para este caso de estudio.
- Lo primero que nos llama la atención al analizar este caso es que la producción aumento muy poco, aproximadamente 300 toneladas más por día.
- Se realizo el mismo ejercicio pero disminuyendo el tiempo de falla en un 50%, dando como resultado un aumento en 800 toneladas por día, evidenciando que el sistema no es muy sensible a esta variable.
- Otro factor relevante en este caso es el sustancial aumento del tiempo en que los piques que conectan el nivel de producción con el intermedio pasan llenos.
- No se observa un aumento en la utilización de los camiones.
- Se observa que los piques que conectan el nivel de transporte intermedio con el nivel de transporte principal, no presentan aumento apreciable en su porcentaje de tiempo que permanecen llenos.
- Todo lo exhibido anteriormente nos da cuenta de que al disminuir el tiempo de fallas aumenta la disponibilidad de los LHD, aumentando la productividad del nivel de producción. Lamentablemente este hecho no se ve reflejado a nivel de sistema minero ya que como fue intuido en el caso base, existe un cuello de botella en el nivel de transporte intermedio. Es decir al tener más tiempo disponible para trabajar los LHD, mantienen más tiempo sus piques llenos, pero no existen recursos en el nivel de transporte intermedio para satisfacer la nueva demanda.

### 4.3. Casos de estudio B: Equipos camión con un 50% menos de tiempo de fallas.

El caso B corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones operacionales del caso base a excepción del tiempo de falla de los camiones, el cual se ha reducido. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

Equipos	Cantidad
LHD	16
Camión	4
Tren	2

Tabla 41: Cantidad de equipos caso estudio B

- Tiempos de fallas de los equipos.

Fallas	Tiempo [min]
LHD	117
Camión	44

Tabla 42: Tiempo de falla de equipos caso estudio B

#### 4.3.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso C y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

Réplica (producción)	[Kton/mes]	[Kton/día]
Máximo	1009.1	32.6
Mínimo	980.1	31.6
Promedio	995.3	32.1

Tabla 43: Producción mensual y diaria del caso estudio B

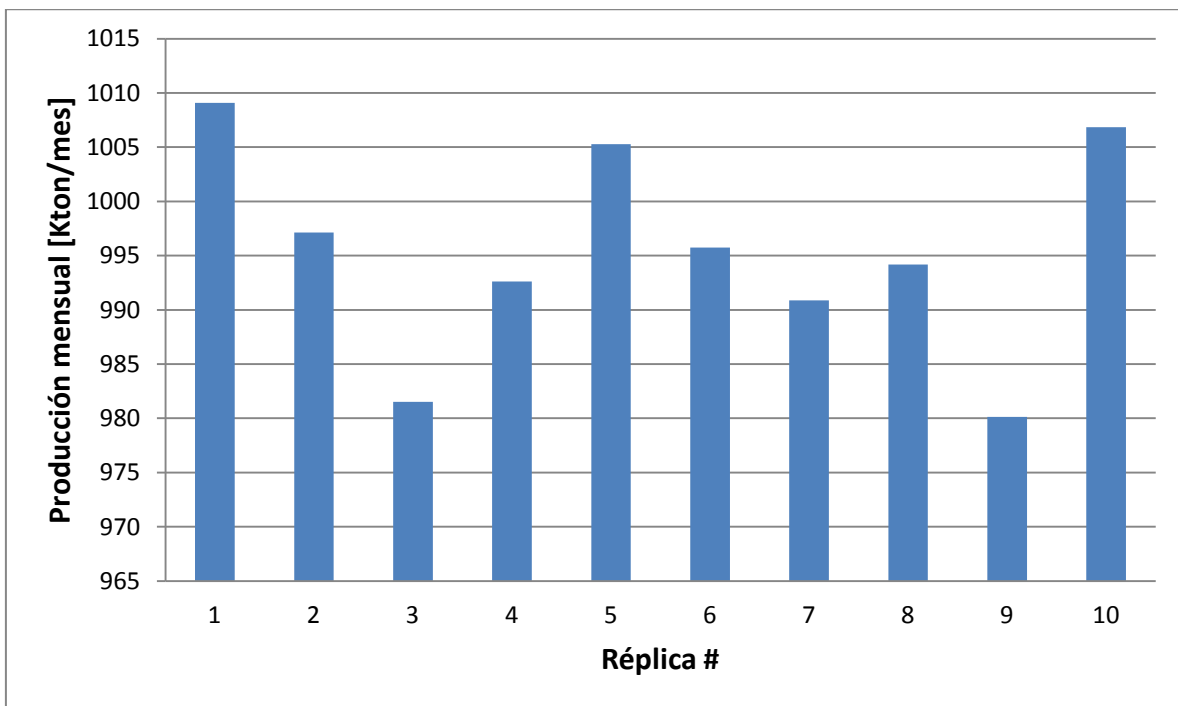


Figura 35: Producción mensual caso estudio B

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

<b>Producción diaria</b>	<b>[Kton/día]</b>
Mínimo	18.4
Máximo	35.6
Promedio	32.1

Tabla 44: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio B

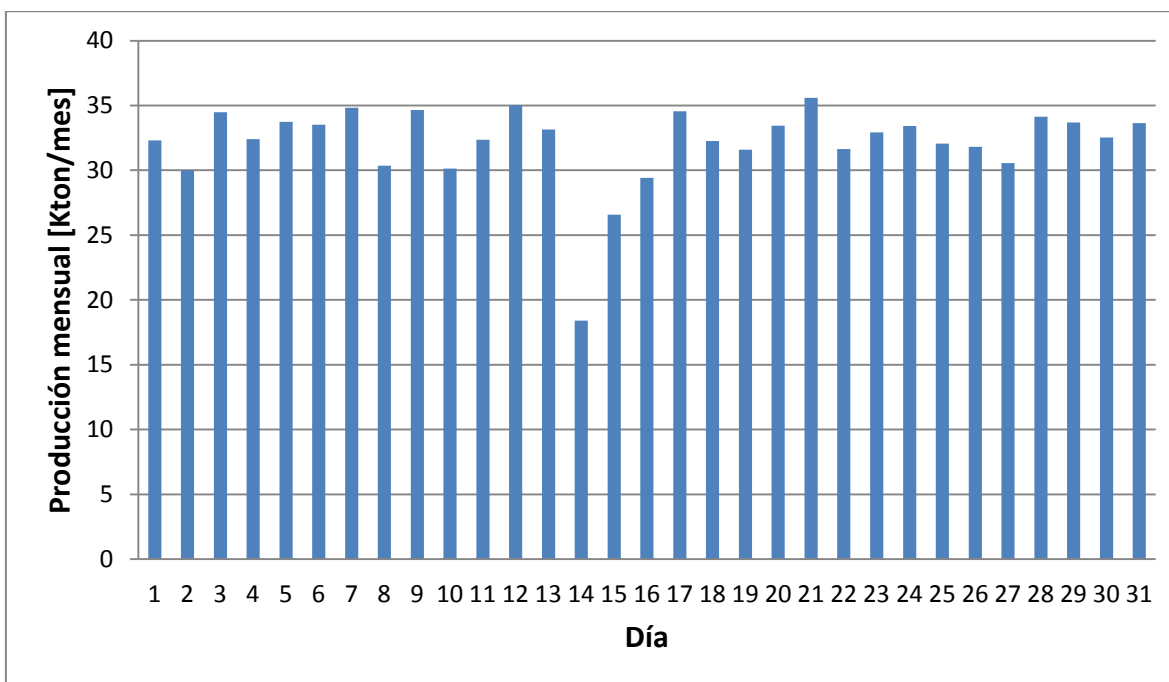


Figura 36: Producción diaria caso estudio B

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

Equipo	Disponibilidad %	Utilización %
LHD 6	72.6	57.5
LHD 7	72.6	63.3
LHD 8	72.6	63.0
LHD 9	72.3	54.1
LHD 10	72.3	62.5
LHD 11	72.3	69.3
LHD 12	72.3	69.1
LHD 13	72.3	71.0
LHD 14	72.3	73.0
LHD 15	72.6	72.0
LHD 16	72.3	71.6
LHD 17	72.3	67.8
LHD 18	72.3	67.8
LHD 19	72.3	47.7
LHD 20	72.3	47.4
LHD 784	72.3	71.7
Camiones	85.0	78.0
Trenes	84.0	71.0

Tabla 45: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio B

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 30 y 31.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	88.6	11.2
P7	-	85.9	14.0
P8	-	86.3	13.7
P9/10_3	-	99.8	-
P9/10_5	-	75.5	24.6
P10_1	-	99.0	1.0
P11/12_2	-	96.1	3.8
P11/12_4	-	85.2	14.8
P13/14_1	-	85.6	13.9
P13/14_2	1.8	92.7	5.5
P13/14_4	-	87.4	12.6
P14_3	16.7	83.2	-
P15/16_1	-	85.9	14.0
P15/16_2	1.9	92.1	6.0
P15/16_3	-	85.3	14.6
P17/18_1	-	80.1	19.5
P17/18_2	-	79.8	20.2
P19/20_1	-	70.8	29.3
P7/8_4	-	97.5	2.4

Tabla 46: Estado de los piques de traspaso caso estudio B

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	75.7	24.2
PPAL2	-	74.9	24.9
PPAL3	-	75.2	24.6
PPAL4	-	76.5	23.3

Tabla 47: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio B

#### 4.3.2. Análisis

- Lo primero que observamos es que existe un aumento sustancial de la producción diaria del sistema, aumentando aproximadamente 3000 toneladas.
- Se aprecia además como efecto secundario a la disminución del tiempo de falla de los camiones, que los equipos LHD aumentan su utilización.
- Por otra parte se aprecia una disminución considerable de los tiempos en que los piques de traspaso que unen el nivel de producción con el nivel de transporte intermedio permanecen llenos.
- Con respecto a los camiones existe un aumento en su disponibilidad y utilización, a diferencia del caso de los LHD que aumentaba su disponibilidad y disminuía la utilización.
- Los trenes también aumentan su utilización debido al mayor flujo de mineral proveniente del nivel de transporte intermedio.
- Por último se puede observar que los piques que conectan el nivel de transporte intermedio con el nivel de transporte principal, aumentan su porcentaje de tiempo en que permanecen llenos. Debido a que los camiones aumentan su productividad en el nivel de transporte intermedio.
- Todo lo exhibido anteriormente nos da cuenta de que al aumentar la disponibilidad a los camiones, se da más continuidad al sistema minero, aumentando el flujo de mineral hacia los niveles inferiores.



#### 4.4. Caso de estudio C: Equipos camión con un 50% menos de tiempo de fallas y LHD con 25% menos de tiempo de fallas.

El caso C corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones operacionales del caso base a excepción del tiempo de falla para los equipos LHD y camión, el cual se ha reducido. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

Equipos	Cantidad
LHD	16
Camión	4
Tren	2

Tabla 48: Cantidad de equipos caso estudio C

- Tiempos de fallas de los equipos.

Fallas	Tiempo [min]
LHD	88
Camión	44

Tabla 49: Tiempo de falla de equipos caso estudio C

##### 4.4.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso C y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

Réplica (producción)	[Kton/mes]	[Kton/día]
Máximo	1015.9	32.8
Mínimo	997.1	32.2
Promedio	1009.1	32.6

Tabla 50: Producción mensual y diaria del caso estudio C

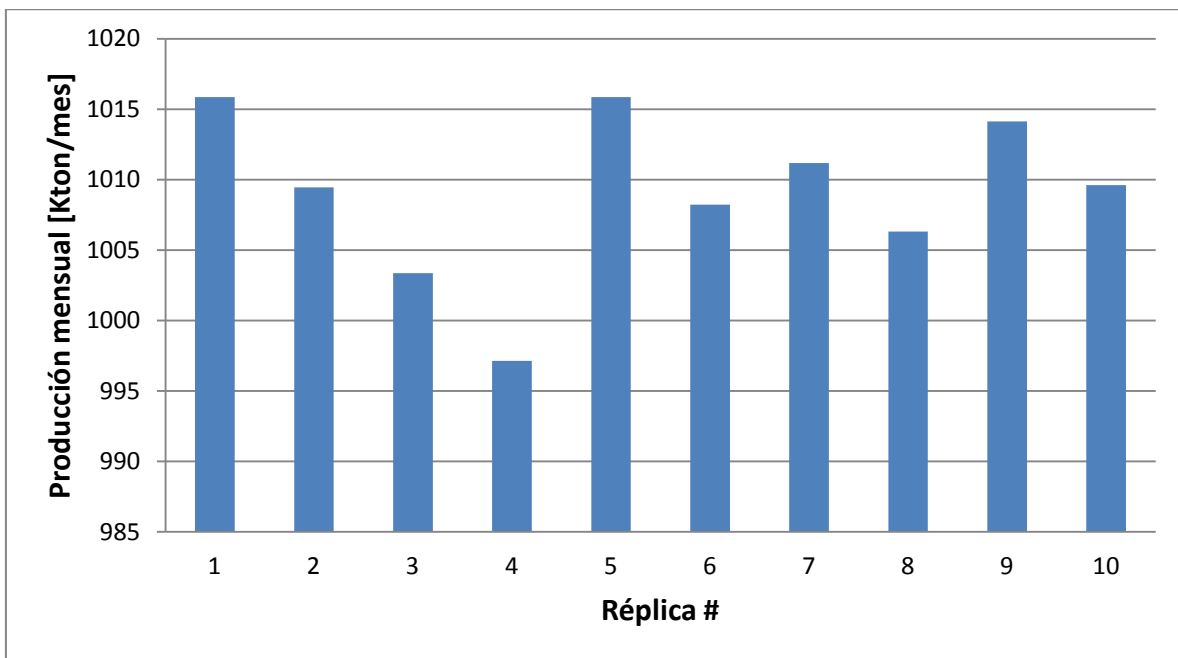


Figura 37: Producción mensual caso estudio C

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

<b>Producción diaria</b>	<b>[Kton/día]</b>
Mínimo	18.8
Máximo	36.0
Promedio	32.6

Tabla 51: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio C

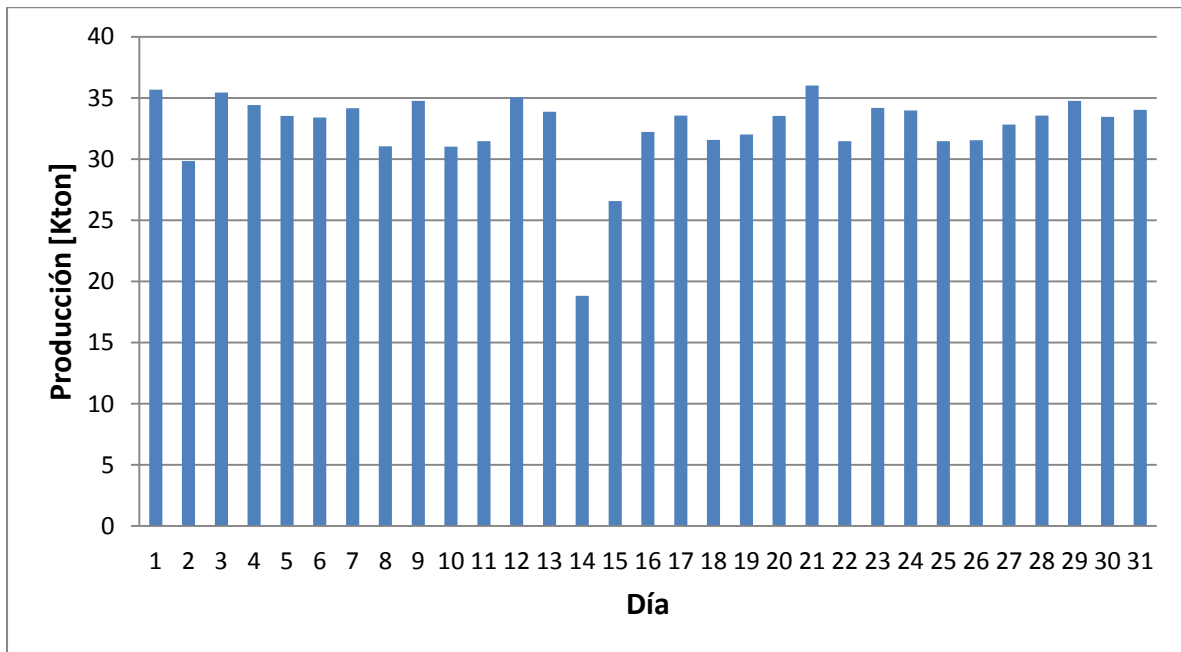


Figura 38: Producción diaria caso estudio C

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

Equipo	Disponibilidad %	Utilización %
LHD 6	77.9	54.2
LHD 7	77.9	57.8
LHD 8	77.9	58.0
LHD 9	77.6	48.0
LHD 10	77.6	58.4
LHD 11	77.6	66.1
LHD 12	77.6	67.5
LHD 13	77.6	69.8
LHD 14	77.6	72.4
LHD 15	77.9	70.8
LHD 16	77.6	69.7
LHD 17	77.9	65.3
LHD 18	77.9	66.0
LHD 19	77.9	40.2
LHD 20	77.9	40.8
LHD 784	77.9	73.4
Camiones	85.0	78.0
Trenes	84.0	72.0

Tabla 52: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio C

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 37 y 38.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	80.8	19.2
P7	-	76.3	23.7
P8	-	76.8	23.2
P9/10_3	-	100.0	-
P9/10_5	-	63.8	36.2
P10_1	-	99.2	-
P11/12_2	-	94.1	5.8
P11/12_4	-	75.4	24.6
P13/14_1	-	74.3	25.4
P13/14_2	1.7	88.9	9.4
P13/14_4	-	77.1	22.9
P14_3	15.4	84.5	-
P15/16_1	-	70.7	29.3
P15/16_2	1.6	88.5	9.9
P15/16_3	-	72.8	27.2
P17/18_1	-	65.1	34.8
P17/18_2	-	63.4	36.6
P19/20_1	-	58.1	41.9
P7/8_4	-	96.5	3.5

Tabla 53: Estado de los piques de traspaso caso estudio C

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	74.8	25.1
PPAL2	-	74.6	25.3
PPAL3	-	75.4	24.5
PPAL4	-	75.6	24.3

Tabla 54: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio C

#### 4.4.2. Análisis

- Podemos observar que existe un aumento en la disponibilidad de los LHD pero una disminución en la utilización con respecto al caso B. Esto se debe a que al aumentar la productividad de los LHD los camiones nuevamente no dan abasto para satisfacer la demanda.
- Lo concluido en el punto anterior se ve reflejado en el aumento que experimentan los piques que conectan el nivel de producción con el nivel de transporte intermedio respecto al tiempo en que pasan llenos.
- Los camiones mantienen la disponibilidad y utilización del caso B, es decir aunque exista un aumento en las labores en el nivel de producción, el nivel de transporte intermedio ya está trabajando al límite. Produciéndose en los piques lo explicado en el segundo punto. Además observamos que no aumenta el tiempo que pasan llenos los piques desde el nivel de transporte intermedio al nivel de transporte principal, respecto al caso B.
- Es decir no hay mejoras sustanciales al aumentar la disponibilidad de los equipos LHD debido a que el cuello de botella se genera en el nivel de transporte intermedio por los camiones que ahí operan.

#### 4.5. Casos de estudio D: Agregar un camión más al caso base

El caso D corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones operacionales del caso base pero agregando un camión más. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>
LHD	16
Camión	5
Tren	2

Tabla 55: Cantidad de equipos caso estudio D

- Tiempos de fallas de los equipos.

<b>Fallas</b>	<b>Tiempo [min]</b>
LHD	117
Camión	87

Tabla 56: Tiempo de falla de equipos caso estudio D

##### 4.5.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso D y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

<b>Réplica (producción)</b>	<b>[Kton/mes]</b>	<b>[Kton/día]</b>
Máximo	1046.4	33.8
Mínimo	1032.1	33.3
Promedio	1041.6	33.6

Tabla 57: Producción mensual y diaria del caso estudio D

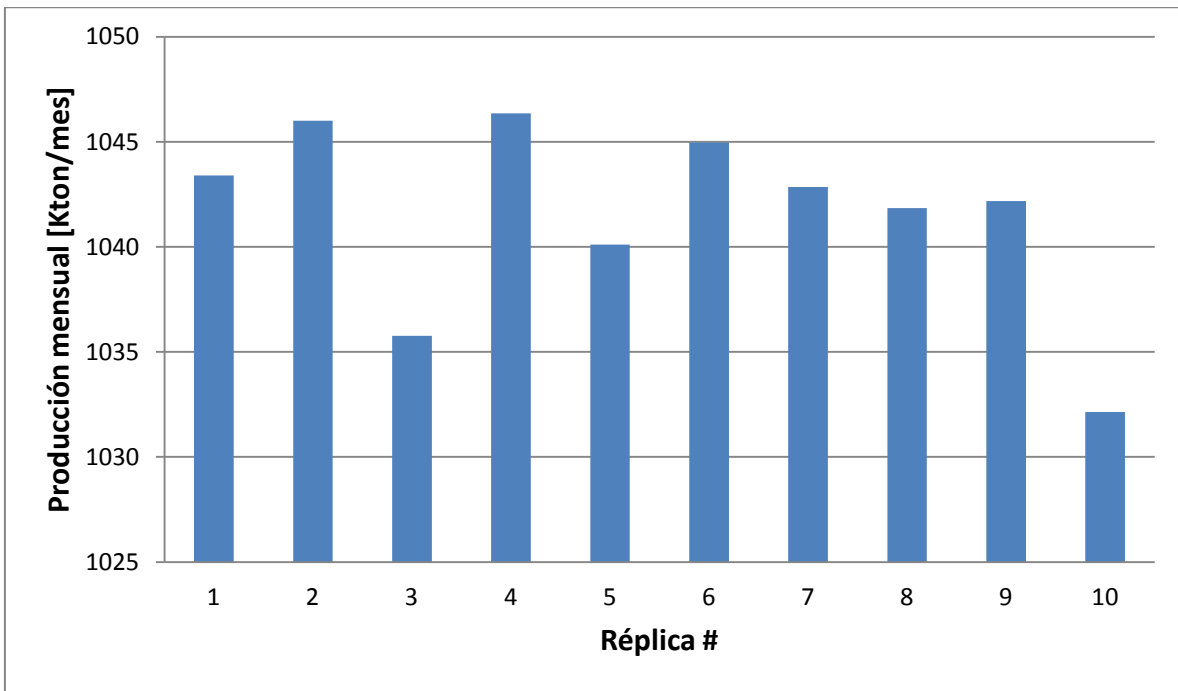


Figura 39: Producción mensual caso estudio D

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

Producción diaria	[Kton/día]
Mínimo	22.0
Máximo	37.3
Promedio	33.6

Tabla 58: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio D

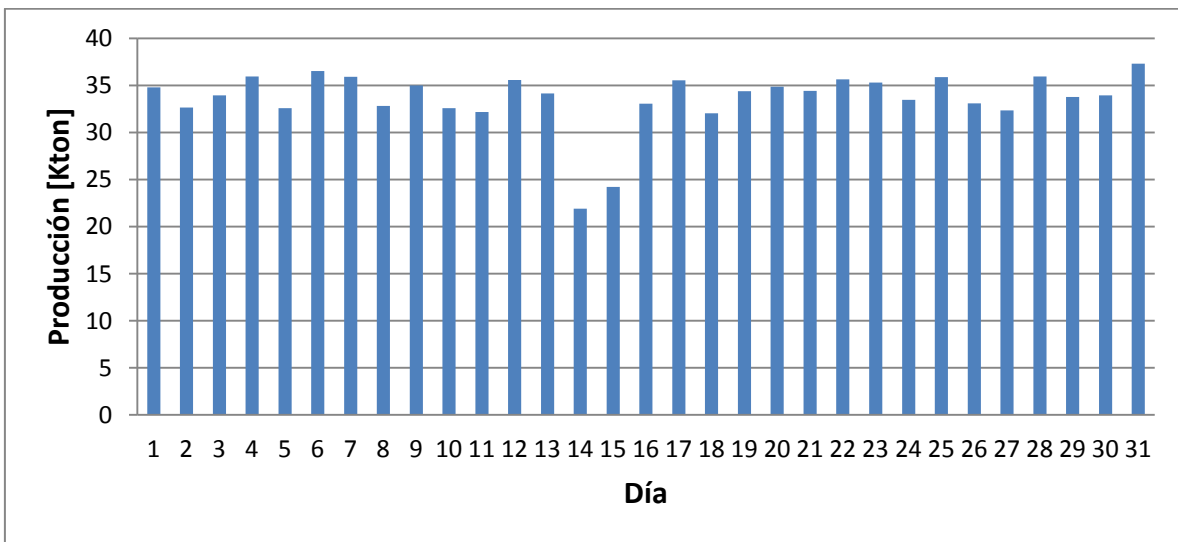


Figura 40: Producción diaria caso estudio D

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

<b>Equipo</b>	<b>Disponibilidad %</b>	<b>Utilización %</b>
LHD 6	72.6	58.0
LHD 7	72.6	67.6
LHD 8	72.6	68.3
LHD 9	72.3	60.7
LHD 10	72.3	64.7
LHD 11	72.3	70.7
LHD 12	72.3	70.5
LHD 13	72.3	71.8
LHD 14	72.3	73.3
LHD 15	72.6	72.1
LHD 16	72.3	71.3
LHD 17	72.6	69.5
LHD 18	72.6	69.7
LHD 19	72.6	56.7
LHD 20	72.6	56.7
LHD 784	72.6	71.5
Camiones	76.0	75.0
Trenes	84.0	74.0

Tabla 59: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio D

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 44 y 45.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	93.9	5.7
P7	-	92.0	7.8
P8	-	91.9	8.0
P9/10_3	-	99.7	-
P9/10_5	-	83.9	16.0
P10_1	-	99.5	-
P11/12_2	-	96.2	3.8



P11/12_4	-	89.8	10.1
P13/14_1	1.6	90.6	7.8
P13/14_2	5.5	90.4	4.1
P13/14_4	-	91.9	7.8
P14_3	12.3	87.3	-
P15/16_1	-	92.3	7.3
P15/16_2	3.5	92.5	4.0
P15/16_3	-	91.2	8.6
P17/18_1	1.0	89.6	9.3
P17/18_2	-	87.0	13.0
P19/20_1	-	80.2	19.8
P7/8_4	-	97.7	2.1

Tabla 60: Estado de los piques de traspaso caso estudio D

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	73.5	26.4
PPAL2	-	73.6	26.3
PPAL3	-	73.6	26.4
PPAL4	-	74.5	25.3

Tabla 61: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio D

#### 4.5.2. Análisis

- Lo primero que nos llama la atención es el gran aumento de productividad del sistema al agregar un camión más, aproximadamente 4000 toneladas más por día. Aun mayor que al disminuir el tiempo de falla de los camiones (3000 toneladas más por día). Esto ratifica la sensibilidad de la producción del sistema minero respecto de este nivel, particularmente de estos equipos.
- Se puede apreciar la inmensa disminución del tiempo en que los piques de traspaso desde el nivel de producción al nivel de transporte intermedio pasan llenos. Mayor que para los casos de estudio anteriores.
- También se aprecia el significativo aumento de la utilización de los equipos LHD, esto está directamente relacionado al punto anterior, ya que al disminuir el tiempo en que los puntos de vaciado están llenos, permite a los LHD seguir operando.

- El aumento en la utilización de los trenes es evidente, siendo superior a todos los casos anteriores. Ya que con un camión extra aumenta el flujo de mineral en los piques principales.
- La disponibilidad de los camiones no aumenta, esto era esperable ya que los tiempos de falla y mantenciones no fueron cambiados, y el no aumento de la utilización se debe a que aunque haya un camión mas, siguen trabajando todos al límite, sin tiempos de ocio fuera del perdido en los cambios de turno.
- Con respecto a los piques principales, aumentan su porcentaje de tiempo lleno lo que era de esperarse debido a tener un camión más en el nivel de transporte principal.

#### 4.6. Caso de estudio E: Agregar un tren más al caso base

El caso E corresponde a la simulación del modelo del sistema minero, bajo las condiciones operacionales del caso base pero agregando un camión más. Se realizó la simulación de un mes (31 días) de producción en el software Promodel corriendo 10 replicaciones del modelo.

- Equipos presentes en el modelo.

Equipos	Cantidad
LHD	16
Camión	4
Tren	3

Tabla 62: Cantidad de equipos caso estudio E

- Tiempos de fallas de los equipos.

Fallas	Tiempo [min]
LHD	117
Camión	87

Tabla 63: Tiempo de falla de equipos caso estudio E

##### 4.6.1. Resultados

Se realizó la simulación del caso E y se obtuvieron las siguientes estadísticas para las replicaciones hechas del modelo.

Réplica (producción)	[Kton/mes]	[Kton/día]
Máximo	929.5	30.0
Mínimo	906.1	29.2
Promedio	919.0	29.6

Tabla 64: Producción mensual y diaria del caso estudio E

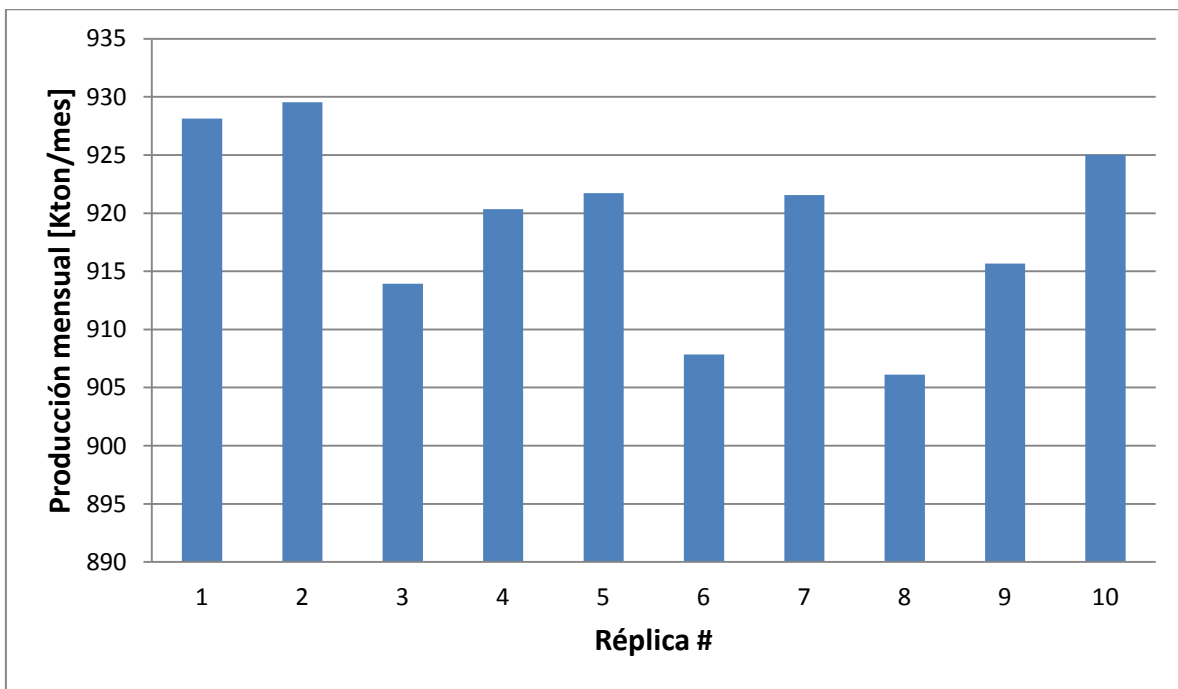


Figura 41: Producción mensual caso estudio E

Se obtuvo el tonelaje producido diariamente a partir del promedio de las 10 réplicas del modelo.

<b>Producción diaria</b>	<b>[Kton/día]</b>
Mínimo	16.1
Máximo	33.0
Promedio	29.7

Tabla 65: Estadística de la producción diaria promedio caso estudio E

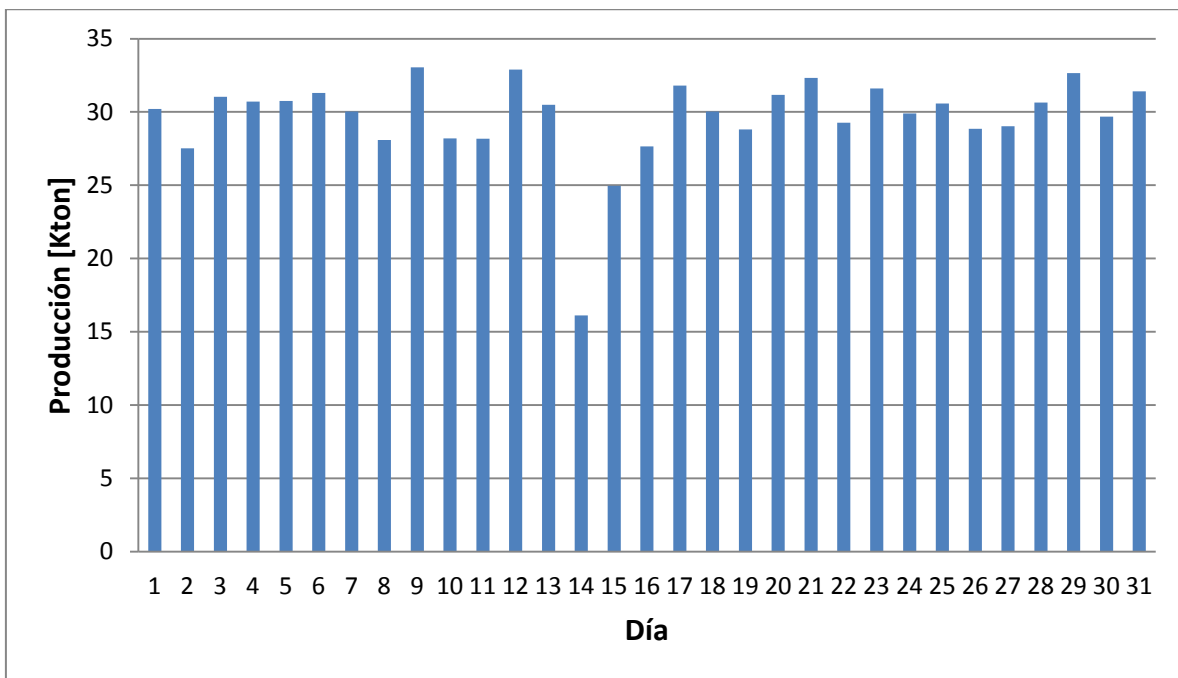


Figura 42: Producción diaria caso estudio E

Se obtuvieron las disponibilidades y utilizaciones de los equipos presentes en el modelo.

Equipo	Disponibilidad %	Utilización %
LHD 6	72.6	52.9
LHD 7	72.6	54.7
LHD 8	72.6	54.5
LHD 9	72.3	45.2
LHD 10	72.3	58.8
LHD 11	72.3	66.7
LHD 12	72.3	67.6
LHD 13	72.3	68.7
LHD 14	72.3	71.1
LHD 15	72.6	69.6
LHD 16	72.3	68.2
LHD 17	72.6	60.9
LHD 18	72.6	60.9
LHD 19	72.6	36.7
LHD 20	72.6	37.3
LHD 784	72.6	72.1
Camiones	76.0	75.0
Trenes	84.0	44.0

Tabla 66: Resultados de disponibilidad y utilización de equipos caso estudio E

Los porcentajes de tiempo en que los piques están vacíos, parcialmente ocupados y llenos se muestran en las tablas 51 y 52.

- Piques que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo), a excepción de los piques (P7/8\_4), (P9/10\_3), (P10\_1) y (P11/12\_2) que van desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal. La abreviatura P9/10\_3 corresponde al pique número 3 que utiliza la calle 9 y 10.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
P6	-	78.4	21.6
P7	-	76.3	23.7
P8	-	76.4	23.7
P9/10_3	-	100.0	-
P9/10_5	-	65.8	34.2
P10_1	-	99.4	-
P11/12_2	-	96.8	3.1
P11/12_4	-	78.5	21.5
P13/14_1	-	72.8	26.8
P13/14_2	-	86.9	12.4
P13/14_4	-	79.0	21.0
P14_3	14.9	84.8	-
P15/16_1	-	73.0	27.0
P15/16_2	1.2	86.8	12.1
P15/16_3	-	74.0	26.0
P17/18_1	-	65.7	34.2
P17/18_2	-	65.7	34.3
P19/20_1	-	61.2	38.8
P7/8_4	-	98.1	1.8

Tabla 67: Estado de los piques de traspaso caso estudio E

- Piques principales que van desde el nivel de transporte intermedio (o nivel de acarreo) hacia el nivel de transporte principal.

<b>PIQUE</b>	<b>%VACIO</b>	<b>%OCUPADO</b>	<b>%LLENO</b>
PPAL1	-	84.2	15.5
PPAL2	-	84.5	15.2
PPAL3	-	84.4	15.3
PPAL4	-	85.0	14.7

Tabla 68: Estado de los piques de traspaso principales caso estudio E

#### 4.6.2. Análisis

- Es posible apreciar que la productividad del sistema aumenta insignificadamente, aproximadamente 300 toneladas por día.
- No se producen aumentos de utilización apreciable para los equipos LHD ni para los camiones.
- Disminuye significativamente la utilización de los trenes.
- No hay cambios en el porcentaje de tiempo que pasan llenos los piques de traspaso desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte intermedio. Sin embargo podemos observar que los piques que unen el nivel de transporte intermedio con el nivel de transporte principal, es decir los piques principales, disminuyen su porcentaje de tiempo lleno.
- A partir de todas estas observaciones podemos darnos cuenta que el sistema es muy poco sensible a agregar un tren, debido a que el cuello de botella al flujo de mineral existe en el nivel de transporte intermedio y no en el de transporte principal.

#### **4.7. Propuesta para cumplir el plan minero**

A continuación se detallarán y analizarán las distintas propuestas que se llevaron a cabo con el fin de lograr la producción de aproximadamente 39 [Kton/día].

##### **4.7.1. Sistema con 6 camiones**

Se agregaron dos camiones dejando todos los demás parámetros igual que el caso base. Se obtuvo una producción de 36146 toneladas por día. No se logró cumplir con el plan minero y se pudo apreciar en la información más detallada acerca de los equipos que a diferencia de todos los casos analizados anteriormente, los camiones ahora presentan tiempo ocioso es decir hay un porcentaje de tiempo (2%) en el que el equipo está operativo y desocupado. Esto nos hace pensar que el nivel de transporte principal es el que no cumple las expectativas para esta cantidad de camiones.

##### **4.7.2. Sistema con 5 camiones y tres trenes.**

Se agregó un camión y un tren más al sistema, dejando los demás parámetros igual al caso base. Se obtuvo una producción de 33870 toneladas por día. Una vez más no se cumple con el plan minero y se pudo apreciar que la utilización de los trenes es muy baja. Por esto el siguiente paso fue tratar de saturar el nivel de los trenes.

##### **4.7.3. Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y 3 trenes.**

Con el fin de saturar el nivel de transporte principal, pensando que esto podría aumentar drásticamente la producción debido a la baja utilización de los trenes en el caso anterior, se corrió el sistema con 6 camiones, se disminuyó el tiempo de fallas de los camiones en un 25% y se agregó un tren más. La producción fue de 36000 toneladas por día. Este resultado nos desconcertó ya que los camiones seguían teniendo tiempo de ocio, lo que implica que no se debía a que los piques principales tenían mucho tiempo en estado lleno, además la utilización de los trenes seguía siendo baja. Esto nos llevó a la conclusión que para poder lograr con las metas productivas era necesario intervenir también la operación de los LHD, supuesto impensado antes debido a los bajos resultados en los casos de estudio A y C.

##### **4.7.1. Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y LHD y 3 trenes.**

Con esta configuración se logra producir 39600 toneladas por día, cumpliendo con el plan minero. Se decidió quitar un tren ya que no es tan concluyente que sea decisivo a la hora de lograr esta producción.

4.7.2. Sistema con 6 camiones, 25% menos de tiempo de falla en camiones y LHD y 2 trenes.

Se utiliza la misma configuración que el caso anterior pero con solo dos trenes en el sistema, obteniendo una producción de 39300 toneladas por día, el que es solo un poco inferior al conseguido anteriormente.

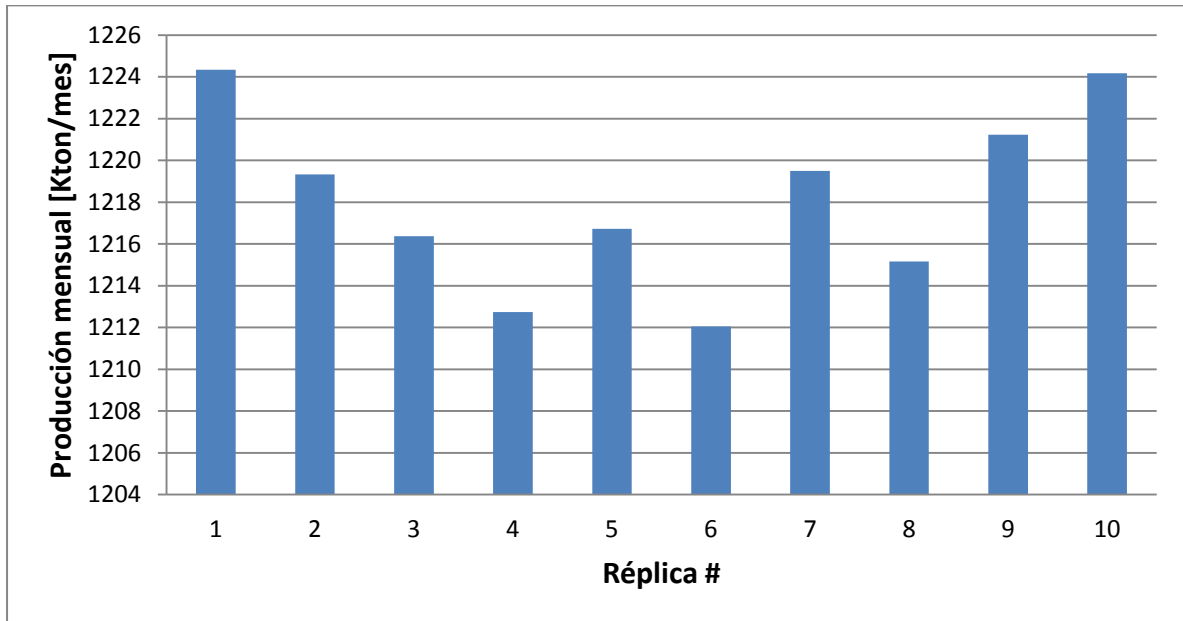


Figura 43: Producción mensual caso que cumple el plan minero

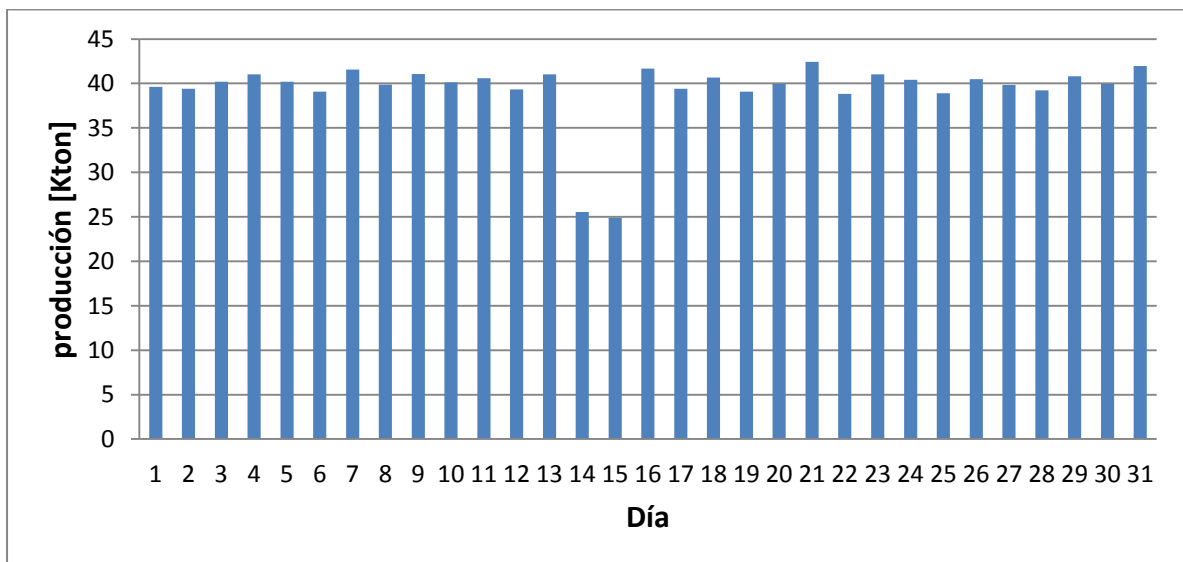


Figura 44: Producción diaria caso que cumple el plan minero



#### **4.8. Discusión final**

Como se pudo apreciar con los análisis anteriores, en un sistema de esta envergadura son muchos los parámetros que se pueden intervenir con el objetivo de obtener resultados distintos en las variables de salida del modelo. No todos los parámetros son igualmente efectivos a la hora alcanzar un determinado objetivo, es decir la o las variables de salida en estudio tienen distinta sensibilidad a las variaciones de estos parámetros.

Para el trabajo realizado en esta memoria la principal variable en estudio es la producción del sistema minero y en segundo lugar el estado de los piques de traspaso y la utilización de los equipos. Con respecto a la producción del sistema se pudo comprobar que los casos en que se mejoraba la productividad del nivel de transporte intermedio, ya sea disminuyendo los tiempos de falla de los camiones o agregando un camión, produjeron los mayores aumentos en la productividad del sistema minero completo, aumentando hasta en 4000 toneladas por día la producción. Esto se dio así ya que tal como se intuyó de los resultados del caso base, existe un cuello de botella en el nivel de transporte intermedio, es decir la cantidad de camiones o el tiempo operativo que presentan, no dan abasto para el flujo de mineral proveniente del nivel de producción.

En relación a las segundas variables en estudio (estado de los piques y utilización de equipos), también se observó una mayor sensibilidad a los casos en que se altera el comportamiento en el NTI ya que al hacerse más fluido la operación de los camiones retirando mineral de los piques, el tiempo en que estos están llenos disminuye. A su vez al tener más tiempo disponible los piques, los LHD aumentan su utilización. Por estos argumentos discutidos hasta aquí, podemos defender al caso de estudio D como el que logra los mejores resultados a los objetivos propuestos.

A pesar de que se mejoró notablemente la productividad del sistema minero, podemos notar que el caso de estudio elegido no logra cumplir con el tonelaje impuesto por el plan minero. A fin de llevar más allá el trabajo aquí realizado, se propuso encontrar un escenario que logre cumplir el plan minero con el que se rige esta faena.

## 5. CONCLUSIONES

Luego de haber realizado el trabajo que se presentó en esta memoria, es concluyente la dificultad existente a la hora de intentar comprender el comportamiento de un sistema de las dimensiones y complejidad como el estudiado en el presente informe. Al de tratarse de un sistema minero compuesto por distintos niveles operacionales, que interactúan entre sí y donde intervienen distintas estructuras, equipos y tiempos de trabajo, se vuelve engorroso evaluar la conducta global del sistema.

La simulación de procesos se hace una herramienta imprescindible a la hora de medir la respuesta a la intervención de ciertos parámetros que son parte de este conjunto de procesos, pudiendo exponerlo a distintos escenarios operacionales para buscar un resultado deseado. Además es muy útil ya que permite obtener importantes datos y estadísticas con respecto al funcionamiento del sistema, como también de cada uno de los componentes de éste. Presenta múltiples herramientas a la hora de implementar las restricciones, requerimientos y formas de trabajo que se ven involucradas en la operación real, en el modelo computacional confeccionado, logrando así reproducir de mejor manera el sistema minero en estudio.

Se cumplió con el objetivo general de determinar la productividad de una mina subterránea explotada por el método de Block/Panel Caving, compuesta por distintos niveles de operación, tomando en cuenta las interferencias operacionales que se producen por el trabajo realizado en los distintos niveles de la mina. Además se cumplió con los objetivos específicos que se impusieron a las distintas etapas de desarrollo del trabajo realizado en esta memoria, donde cabe destacar la confección de un modelo computacional representativo del sistema en estudio, el cual fue exitosamente validado y empleado en la evaluación de los distintos escenarios de estudio.

El principal supuesto con que se inició este trabajo, fue que existe una repercusión en cada nivel operacional de la mina, producto del trabajo realizado en los demás niveles, esta interferencia entre los niveles genera tiempos muertos en la operación, afectando directamente la productividad del sistema minero, la que a su vez genera un impacto en el plan minero. Este supuesto pudo ser observado en la simulación y también en los resultados obtenidos, principalmente en el porcentaje de tiempo en que los piques están llenos, la disponibilidad y utilización de los equipos en los distintos niveles y finalmente en la producción. De igual forma se pudo constatar el supuesto secundario de que existe una gran dificultad a la hora de predecir el comportamiento de un sistema del tamaño y complejidad como el estudiado, la reacción observada a la manipulación de ciertos parámetros muchas veces no fue la esperada, siendo de gran ayuda la simulación a la hora de evaluar el sistema ante diversos escenarios.

Con respecto al caso base que se puso a prueba, el cual reproduce las actuales condiciones de operación de la faena en estudio, se observa en los resultados del experimento de simulación que la producción obtenida fue de 29.3 mil toneladas por día, un 25% menos que lo dictaminado por el plan minero, en el cual la producción diaria debería ser de 39 mil toneladas. Además se observó que los piques de traspaso pasaban un 25% del tiempo lleno y que la utilización promedio para los equipos LHD fue de 58%, 75% para los camiones y 65% para los trenes.

Los parámetros relevantes para la sensibilización hecha del caso base son los siguientes:

- Tiempos de fallas en los equipos LHD y camión.
- Cantidad de Camiones y trenes.

En relación a las anteriores, se observa en los resultados de los experimentos de simulación que:

- La producción es poco sensible a la disminución de los tiempos de falla de los equipos LHD y también al hecho de agregar un tren al sistema. Por otra parte al disminuir los tiempos de falla de los camiones o al agregar un camión más al sistema se obtiene un considerable aumento de la producción, siendo éste un 9% para el primero y 13% para el segundo, mostrando una gran sensibilidad ante la variación de estos parámetros.
- Es posible evidenciar que la disminución del tiempo de falla de los camiones y agregar un camión al sistema, traen como consecuencia la disminución del porcentaje de tiempo en que los piques de traspaso se encuentran llenos, llegando a ser de 18% menos para el segundo caso. Además de un aumento de un 9% en la utilización de los equipos LHD y tren en el caso de agregar un camión mas.
- Lo anterior prueba que la baja productividad se debe principalmente a que existe un cuello de botella en el nivel de transporte intermedio. Debido a la baja cantidad de equipos o al elevado tiempo en que los equipos se encuentran con fallas que son impedimento para operar.
- De los casos de estudio realizado, se pudo concluir que el escenario que considera agregar un camión más al sistema, es el que consigue los mejores resultados, logrando una producción de 33.6 mil toneladas por día en promedio, un porcentaje de tiempo de piques llenos de 7%, una utilización de los LHD y trenes de 67% y 74% en promedio respectivamente.
- Ninguno de los escenarios simulados logro cumplir la meta productiva impuesta por el plan minero de la faena en estudio.

La configuración del sistema que logró cumplir el plan minero y generar una producción de 39,3 mil toneladas por día en promedio, fue aquél que considera agregar 2 camiones extra y disminuir los tiempos de falla de los camiones y LHD en un 25%.

Se puede apreciar que a pesar de que el modelo demostró ser poco sensible a la disminución de los tiempos de falla de los LHD, fue imprescindible a la hora de alcanzar la producción requerida. Quedando una vez más en evidencia el valor de la simulación al analizar sistemas complejos como es el caso de una mina compuesta por distintos niveles operacionales, en donde realizar de manera empírica las pruebas que aquí fueron hechas, tendría costos elevado en cuanto a dinero y tiempo además de conllevar riesgos, asociados a accidentes al realizar este tipo de experimentos en minería.

## **6. RECOMENDACIONES**

La primera recomendación es continuar con los trabajos de simulación, acercando el modelo aun mas a la realidad de la operación, es decir aumentando los alcances de este. Agregar factores como fallas en los puntos de extracción, colgaduras en los piques de traspasos, problemas asociados a las calles del nivel de producción, etc. Hasta no tener resultados que consideren más variables del sistema, se recomienda avanzar en etapas apuntando a alcanzar la configuración que permite lograr el plan minero.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- 1.- Troncoso, S.H. Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción. Memoria (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2006.
  
- 2.- George N. Panagiotou. National Technical University of Athens, Grecia. Discrete mine system simulation in Europe. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2007. 43-46.
  
- 3.- M. C. Albrecht. Equipment sizing of a material handling system using discrete event simulation. Eichleay Engineers of California, USA. APCOM (application of computers and operation research in the mineral industry) 2005. Chap 60, 449-455.
  
- 4.- Cornejo. M.A. Impacto en la productividad del nivel de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción. Memoria (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008.

## 8. ANEXO A: DETALLE DE LOS TIEMPOS DE LOS EQUIPOS DEL CASO BASE

<b>LHD</b>	<b>6</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantenición	6.58
Horas Operativas	9.26
Horas Reserva	8.16
Disp%	72.59
Util%	53.16

Tabla 69: Detalle de tiempos LHD 6

<b>LHD</b>	<b>7</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantenición	6.58
Horas Operativas	9.24
Horas Reserva	8.19
Disp%	72.59
Util%	53.01

Tabla 70: Detalle de tiempos LHD 7

<b>LHD</b>	<b>8</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantenición	6.58
Horas Operativas	9.37
Horas Reserva	8.05
Disp%	72.59
Util%	53.79

Tabla 71: Detalle de tiempos LHD 8

<b>LHD</b>	<b>9</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	7.65
Horas Reserva	9.71
Disp%	72.32
Util%	44.06

Tabla 72: Detalle de tiempos LHD 9

<b>LHD</b>	<b>10</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	10.12
Horas Reserva	7.24
Disp%	72.32
Util%	58.28

Tabla 73: Detalle de tiempos LHD 10

<b>LHD</b>	<b>11</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	11.44
Horas Reserva	5.92
Disp%	72.32
Util%	65.92

Tabla 74: Detalle de tiempos LHD 11

<b>LHD</b>	<b>12</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	11.67
Horas Reserva	5.68
Disp%	72.32
Util%	67.26

Tabla 75: Detalle de tiempos LHD 12

<b>LHD</b>	<b>13</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	11.89
Horas Reserva	5.46
Disp%	72.32
Util%	68.52

Tabla 76: Detalle de tiempos LHD 13

<b>LHD</b>	<b>14</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	12.42
Horas Reserva	4.93
Disp%	72.32
Util%	71.57

Tabla 77: Detalle de tiempos LHD 14

<b>LHD</b>	<b>15</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	12.06
Horas Reserva	5.37
Disp%	72.59
Util%	69.19

Tabla 78: Detalle de tiempos LHD 15

<b>LHD</b>	<b>16</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.36
Horas Mantención	6.64
Horas Operativas	11.70
Horas Reserva	5.66
Disp%	72.32
Util%	67.40

Tabla 79: Detalle de tiempos LHD 16



<b>LHD</b>	<b>17</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	10.58
Horas Reserva	6.84
Disp%	72.59
Util%	60.72

Tabla 80: Detalle de tiempos LHD 17

<b>LHD</b>	<b>18</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	10.42
Horas Reserva	7.00
Disp%	72.59
Util%	59.80

Tabla 81: Detalle de tiempos LHD 18

<b>LHD</b>	<b>19</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	6.31
Horas Reserva	11.12
Disp%	72.59
Util%	36.20

Tabla 82: Detalle de tiempos LHD 19

<b>LHD</b>	<b>20</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	6.45
Horas Reserva	10.97
Disp%	72.59
Util%	37.03

Tabla 83: Detalle de tiempos LHD 20

<b>LHD</b>	<b>784</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	17.42
Horas Mantención	6.58
Horas Operativas	12.54
Horas Reserva	4.89
Disp%	72.59
Util%	71.95

Tabla 84: Detalle de tiempos LHD 784

<b>Camiones</b>	<b>Horas</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	18.17
Horas Mantención	5.83
Horas Operativas	13.67
Horas Reserva	4.50
Disp%	76
Util%	75

Tabla 85: Detalle de tiempos camiones

<b>TREN</b>	<b>Horas</b>
Horas Hábiles	24.00
Horas Disponibles	20.28
Horas Mantención	3.72
Horas Operativas	13.14
Horas Reserva	7.14
Disp%	84
Util%	65

Tabla 86: Detalle de tiempos trenes