



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

MODELO INTEGRADO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN PARA
PLANES MINEROS DE MEDIANO PLAZO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FELIPE IGNACIO ORELLANA JARA

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

PROFESOR CO-GUÍA:

ENRIQUE JÉLVEZ MONTENEGRO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FREDDY MILLA NANJARÍ

JUAN QUIROZ RETAMAL

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por AMTC

SANTIAGO DE CHILE

2018

MODELO INTEGRADO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN PARA PLANES MINEROS DE MEDIANO PLAZO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

El sistema de transporte de materiales en la minería a cielo abierto corresponde principalmente a sistemas del tipo pala-camión. Este tipo de sistemas puede llegar a representar un alto porcentaje del costo operativo de la mina según algunos autores. Además, la minería a cielo abierto en el largo plazo tiende a productividades menores producto de la profundización de la extracción, por lo que mejorar la eficiencia y productividad de los equipos resulta fundamental. Estos sistemas son complejos de analizar, lo cual se debe tanto a incertidumbre operacional existente como a las interacciones internas que poseen los equipos en el sistema.

La simulación de procesos es una herramienta que permite evaluar este tipo de sistemas complejos, sin embargo, tiene la limitante de que no optimiza, por lo que la metodología desarrollada en este trabajo plantea la generación de un modelo que integre la simulación y la optimización, con la finalidad de realizar una extracción de material que maximice la productividad. Lo anterior se realiza resolviendo un problema de optimización del despacho de camiones durante la simulación, donde se considera las condiciones de la operación en tiempo real.

Se realizan ejercicios de simulación, considerando variabilidad operacional de equipos y procesos, en donde se prueban tres estrategias de despacho de las cuales dos de ellas se basan en un problema de optimización, mientras que la restante resuelve el problema de asignación de camiones mediante criterios de saturación de los equipos de carguío. Los resultados muestran que el modelo propuesto obtiene mejores productividades respecto a estrategias de despacho que se basan en saturación de palas (llegando a tener hasta un 6.6% más de productividad). Además, son capaces de cumplir de manera simple las restricciones de movimiento de material en los diferentes frentes de descarga.

Finalmente, se concluye que las estrategias de despacho que consideran un problema de optimización mejoran de manera significativa los índices operativos de la flota carguío y transporte, tanto a nivel de productividad como utilización efectiva de los equipos.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF MINING ENGINEER
AND MASTER IN MINING ENGINEERING
BY: FELIPE IGNACIO ORELLANA JARA
DATE: JANUARY 2018
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

INTEGRATED SIMULATION AND OPTIMIZATION MODEL FOR MEDIUM-TERM MINING PLANS IN OPEN-PIT MINING

Haulage system in open pit mining corresponds mainly to systems of truck - shovel type. This type of systems can represent a high percentage of the operating cost of the mine according to some authors. In addition, long term open-pit mining tends to lower productivities because of deepening extraction, so improving the efficiency and productivity of the equipment is essential. These systems are complex to analyze, which is due both to existing operational uncertainty and the internal interactions that the equipment have in the system.

The simulation of processes is a tool that allows to evaluate this type of complex systems, however, it has the limitation that it does not optimize, so the methodology developed in this work proposes the generation of a model that integrates both simulation and optimization, in order to perform an extraction process that maximizes productivity. This is done by solving the dispatch optimization problem of trucks during the simulation, which considers the conditions of the operation in real time.

Simulation exercises are performed, considering operational variability of equipment and processes, where three dispatch strategies are tested, which two of them are based on an optimization problem while the remaining solves the problem of assignment of trucks by saturation criteria of loading equipment. The results show that the proposed model obtains better productivities than dispatch strategies based on load equipment saturation (reaching up to 6.6% more productivity). In addition, the model manages to meet in a simple way the constraints of material movement in the different destinations.

Finally, it is concluded that the dispatch strategies that consider an optimization problem can significantly improve the operating rates of loading and hauling fleet in terms of productivity and effective use of the equipment.

*“There is a driving force more powerful than steam,
electricity and nuclear power: the will.”*

– Albert Einstein –

Agradecimientos

Quiero dar gracias a mis padres, por todo el apoyo que he tenido durante estos años, creo que sin ellos no habría podido llegar hasta aquí, por todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho por mí, y por todas sus enseñanzas. Los quiero mucho. También quiero agradecer a mi familia, que me apoyaron desde que llegué a la Universidad y me recibieron en su hogar como un hijo. A mi hermana, mi abuelita y mi abuela, a la tía Rosa, al tata y mi tía Gloria, ya que siempre se preocuparon por mí haciendo las tareas del hogar y ayudándome en todo momento, para que yo pudiese estudiar tranquilo. Se los agradezco en el alma.

A Claudia, por haber sido un pilar fundamental en todos estos años, mi compañera y mi amiga, por toda tu ayuda y cariño, porque siempre creíste en mí, y por haberme regalado los momentos más lindos que he tenido en la vida. Te amo.

A mi profesor guía Nelson Morales, quien confió en mi desde un principio y sin siquiera conocerme, por todo su apoyo y entrega en el desarrollo de este trabajo. Es un excelente profesor y estoy muy agradecido de haber podido ser su alumno. Gracias por todo.

A los integrantes de la comisión, por haberse tomado el tiempo de haber leído este trabajo y r, especialmente a mi profesor co-guía Enrique, quien hizo un trabajo excelente y muy detallado sobre las correcciones. Gracias por su tiempo y dedicación. A toda la gente del laboratorio, en especial a Max, Nelis, Consuelo, Espejo, por sus consejos y ayuda en el desarrollo de este trabajo. Y de manera más que especial, destacar al Japi por su apoyo, por toda su ayuda y por todos los buenos momentos que pasamos en el lab, de verdad te considero un amigo (never forget borde pit).

A mis amigos Orlando y Matamoros (como olvidar al niño rata), por ser realmente unos hermanos. De verdad, les agradezco todo el apoyo y buenos momentos que hemos tenido. Espero que siempre estemos juntos. Y a los Overwatchos, por todos los buenos momentos y partidas, que si bien retrasaron un poco el trabajo, valieron la pena.

Finalmente, agradecer al Advanced Mining Technology Center (AMTC), que mediante el fondo basal FB0809 permitió hacer posible este trabajo, además del grupo minero Antofagasta Minerals (AMSA), por financiar mis estudios durante el pregrado.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2.	Alcances.....	3
1.3.	Contenidos por capítulo.....	3
2	ANTECEDENTES	5
2.1.	Minería a cielo abierto.....	5
2.2.	Planificación minera.....	7
2.2.1	Horizontes de planificación.....	8
2.3.	Incertidumbre operacional.....	8
2.4.	Simulación de eventos discretos.....	9
2.4.1	Generación de modelo de simulación.....	10
2.5.	DSIM.....	14
2.5.1	DSIM Open Pit.....	14
2.5.2	DSIM Core.....	15
2.6.	Estrategias de despacho de camiones en minería a cielo abierto.....	15
2.7.	Norma ASARCO.....	18
2.7.1	Definición de tiempos.....	18
2.8.	Programación Lineal.....	20
2.8.1	Programación lineal aplicada en minería.....	21
2.8.2	Modelo de optimización de despacho.....	22
2.9.	Tipos de despacho a simular.....	25
2.9.1	Optimización continua.....	26
2.9.2	Optimización inicial.....	26
2.9.3	Despacho priorizado.....	26
2.9.4	Criterios de comparación.....	28
3	METODOLOGÍA	29
4	DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN	31
4.1.	Modificación del problema de optimización del despacho.....	31
4.2.	Horizonte de evaluación.....	33
4.3.	Consideraciones en la resolución del problema.....	35

5	DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	37
5.1.	Dinámica operacional del sistema de transporte de materiales.....	37
5.2.	Parámetros operacionales.....	37
5.3.	Interpretación de la incertidumbre operacional	38
5.4.	Lógica de equipos	38
5.5.	Modelo integrado de simulación y optimización.....	42
5.6.	Variación del layout en el tiempo	42
6	EJERCICIO DE SIMULACIÓN SINTÉTICO.....	45
6.1.	Ejercicio de simulación a corto plazo	45
6.1.1	Descripción del caso	45
6.1.2	Input de simulación	47
6.1.3	Resultados y análisis.....	49
6.2.	Ejercicio de simulación a mediano plazo.....	58
6.2.1	Descripción del caso	58
6.2.2	Input de simulación	59
6.2.3	Resultados y análisis.....	60
7	EJERCICIO DE SIMULACIÓN DE CASO REAL	66
7.1.	Descripción del caso	66
7.2.	Input de simulación.....	70
7.3.	Resultados y análisis.....	72
8	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	79
8.1.	Conclusiones.....	79
8.2.	Trabajo Futuro	81
9	BIBLIOGRAFÍA	83
10	ANEXOS	86
10.1.	Anexo A: Inputs.....	86
10.1.1	Ejercicio a corto plazo	86
10.1.2	Ejercicio de simulación de caso real	88
10.2.	Anexo B: Resultados	91
10.2.1	Resultados de ejercicio a corto plazo.....	91
10.2.2	Resultados de ejercicio a mediano plazo	99

Índice de figuras

Figura 1-1: Diagrama de modelo integrado de simulación y optimización.	2
Figura 2-1: Esquema de una mina a cielo abierto. (Newman et al., 2010).	5
Figura 2-2: Ciclo del camión en minería a cielo abierto. (Burt & Caccetta, 2013)	6
Figura 2-3: Etapas para la construcción de un modelo de simulación. (Banks, 1999).	13
Figura 2-4: Interfaz gráfica de DSIM Open Pit.	14
Figura 2-5: Distribución de tiempos según norma ASARCO.	19
Figura 2-6: Esquema de frentes de carga y descarga. (Mena et al., 2013).....	23
Figura 2-7: Diagrama de despacho DSIM OP.	28
Figura 5-1: Lógica general de equipos de simulación	39
Figura 5-2:Lógica de simulación del camión.	40
Figura 5-3: Lógica de simulación de los equipos de carguío.....	41
Figura 5-4: Posicionamiento de equipos en el primer periodo.	43
Figura 5-5: Posicionamiento de equipos en el segundo periodo.....	44
Figura 6-1: Vista en planta del layout simulación.	46
Figura 6-2: Productividad en función del horizonte de evaluación. (30 Camiones).....	49
Figura 6-3: Movimiento total en función del número de camiones.	50
Figura 6-4: Productividad según destino considerando optimización continua.....	52
Figura 6-5: Productividad según destino considerando optimización inicial.	52
Figura 6-6: Productividad según destino considerando despacho priorizado.	53
Figura 6-7:Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. (30 camiones).	54
Figura 6-8: Distribución de tiempos de simulación Equipos de carguío. (30 camiones).....	55
Figura 6-9: Utilización de flota de camiones en función del número de camiones.	56
Figura 6-10: Utilización de equipos de carguío en función del número de camiones.	56
Figura 6-11: Análisis de asignación de camiones. Optimización inicial y continua.....	57
Figura 6-12: Variación del layout en el tiempo	58
Figura 6-13: Productividad diaria promedio en el mediano plazo.....	60
Figura 6-14: Evolución del tiempo de ciclo en el mediano plazo.....	61
Figura 6-15: Producción mensual en chancador. Optimización continua.....	62
Figura 6-16: Producción mensual en chancador. Optimización inicial.	63
Figura 6-17: Producción mensual en chancador. Despacho priorizado.....	63
Figura 6-18: Utilización de flota de camiones en el mediano plazo.	64
Figura 6-19: Utilización de equipos de carguío en el mediano plazo.....	65
Figura 7-1: Topografía de Escondida	67
Figura 7-2: Layout de simulación Escondida. Sector Suroeste	67

Figura 7-3: Layout de simulación Escondida. Sector Sureste	68
Figura 7-4: Layout de simulación Escondida. Sector Norte.	68
Figura 7-5: Distribución de tiempos de simulación según tipo de despacho. Flota de camiones.	76
Figura 7-6: Distribución de tiempos de simulación según tipo de despacho. Equipos de carguío.	76
Figura 10-1: Perfil de velocidad por ruta.	88
Figura 10-2: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (34 camiones).	91
Figura 10-3: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (34 camiones).	91
Figura 10-4: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (34 camiones).	92
Figura 10-5: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (34 camiones)	92
Figura 10-6: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (34 camiones)	92
Figura 10-7: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (34 camiones).....	93
Figura 10-8: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (32 camiones).	93
Figura 10-9: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (32 camiones).	93
Figura 10-10: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (32 camiones).	94
Figura 10-11: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (32 camiones) ...	94
Figura 10-12: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (32 camiones)	94
Figura 10-13: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (32 camiones).....	95
Figura 10-14: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (30 camiones).	95
Figura 10-15: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (30 camiones).	95
Figura 10-16: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (30 camiones).	96
Figura 10-17: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (30 camiones) ...	96
Figura 10-18: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (30 camiones)	96
Figura 10-19: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (30 camiones).....	97
Figura 10-20: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (25 camiones).	97
Figura 10-21: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (25 camiones).	97
Figura 10-22: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (25 camiones).	98
Figura 10-23: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (25 camiones) ...	98
Figura 10-24: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (25 camiones)	98
Figura 10-25: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (25 camiones).....	99
Figura 10-26: Producción mensual en botadero. Optimización continua	99
Figura 10-27: Producción mensual en botadero. Optimización inicial.....	100
Figura 10-28: Producción mensual en botadero. Despacho priorizado.	100
Figura 10-29: Producción mensual en stock. Optimización continua.	101
Figura 10-30: Producción mensual en stock. Optimización inicial.	101
Figura 10-31: Producción mensual en stock. Despacho priorizado.....	102
Figura 10-32: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 1).	102

Figura 10-33: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 1).....	103
Figura 10-34: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 1).....	103
Figura 10-35: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 1).....	103
Figura 10-36: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 2).	104
Figura 10-37: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 2).....	104
Figura 10-38: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 2).....	104
Figura 10-39: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 2).....	105
Figura 10-40: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 3).	105
Figura 10-41: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 3).....	105
Figura 10-42: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 3).....	106
Figura 10-43: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 3).....	106
Figura 10-44: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 4).	106
Figura 10-45: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 4).....	107
Figura 10-46: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 4).....	107
Figura 10-47: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 4).....	107
Figura 10-48: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 5).	108
Figura 10-49: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 5).....	108
Figura 10-50: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 5).....	108
Figura 10-51: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 5).....	109
Figura 10-52: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 6).	109
Figura 10-53: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 6).....	109
Figura 10-54: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 6).....	110
Figura 10-55: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 6).....	110

Índice de tablas

Tabla 6-1: Distancia entre frentes de carga y descarga. Ejercicio a corto plazo.....	47
Tabla 6-2: Demoras programadas consideradas	47
Tabla 6-3: Inputs generales de flota de camiones.....	48
Tabla 6-4: Inputs generales equipos de carguío.....	48
Tabla 6-5: Producción esperada en frente de descarga.....	48
Tabla 6-6: Aumento productivo respecto a despacho priorizado (10 camiones por pala).....	51
Tabla 6-7: Distancia entre frentes de carga y descarga. Ejercicio mediano plazo.....	59
Tabla 6-8: Requerimiento diario.....	59
Tabla 6-9: Reducción de productividad según tipo de despacho.....	61
Tabla 6-10: Cumplimiento del plan en el mediano plazo.....	62
Tabla 7-1: Distancia entre frentes de carga y descarga.....	69
Tabla 7-2: Tipos y número de camiones.....	70
Tabla 7-3: Tiempos de carga, descarga y aculatamiento.....	70
Tabla 7-4: Velocidades utilizadas en el problema de optimización.....	71
Tabla 7-5: Plan de producción.....	71
Tabla 7-6: Extracción total promedio según tipo despacho.....	72
Tabla 7-7: Cumplimiento del plan según tipo de despacho en frentes de carga.....	73
Tabla 7-8: Cumplimiento general del plan por tipo de despacho.....	75
Tabla 7-9: Cumplimiento del plan considerando escenario de producción máxima.....	75
Tabla 7-10: Utilización de equipos en la simulación.....	77
Tabla 7-11: Ejecuciones del problema de optimización según sistema de despacho.....	77
Tabla 7-12: Tiempo de cálculo de simulación según sistema de despacho.....	78
Tabla 10-1: Distribuciones de falla camiones y palas.....	86
Tabla 10-2: Match pala-camión.....	87
Tabla 10-3: Distribución de velocidad por zona.....	88
Tabla 10-4: Fallas de camiones en la simulación.....	89

1 INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto consiste en la extracción de material sobre la superficie de la tierra para recuperar el mineral contenido, o bien, para acceder al mineral que se encuentra a mayor profundidad. Este proceso minero provoca que la superficie de la tierra sea continuamente excavada causando un incremento de profundidad del pit que se formará hasta el término de la vida de la mina (Newman et al., 2010).

El transporte de material es uno de los componentes más importantes en una operación a cielo abierto, llegando a representar para el caso del sistema pala-camión, alrededor del 50% de los costos operacionales e incluso el 60% según algunos autores (Alarie & Gamache, 2002). Por otro lado, la minería a cielo abierto en el largo plazo tiende a productividades menores producto de la profundización de la extracción, por lo que mejorar la eficiencia y productividad de los equipos resulta fundamental.

El sistema pala-camión corresponde al sistema más utilizado para la actividad de transporte de material en la minería a cielo abierto a nivel mundial, debido a que corresponde al sistema más flexible en términos de operación, además, tiene un bajo costo de inversión inicial comparado con los otros sistemas de manejo de materiales, pero su costo operativo es alto, debido a la cantidad de equipos utilizado (Alarie & Gamache, 2002).

Este tipo de sistema de manejo de materiales resulta complejo de analizar debido a la incertidumbre asociada a los equipos y a las interacciones existentes dentro del sistema. Uno de los principales problemas a enfrentar en este sistema corresponde a la utilización eficiente de la flota de carguío y transporte, con el objetivo de minimizar costos y maximizar la eficiencia (Askari-Nasab et al., 2013).

Los métodos deterministas no son apropiados para analizar este tipo de sistemas, debido a que poseen interacciones internas entre equipos que fallan de manera aleatoria, lo cual representa una naturaleza estocástica (Askari-Nasab et al., 2013), por lo que herramientas como simulación de eventos discretos resultan eficientes para determinar dichas interacciones. Sin embargo, la simulación tiene la limitante de que no optimiza y sólo emula la operación. (Banks, 1984)

Por otro lado, la incertidumbre operacional tiene impacto en los resultados del plan minero y la principal fuente de variabilidad viene de los eventos y reasignaciones (Manrriquez, 2015). Considerando todo lo anterior, se propone una metodología que integra un modelo de simulación de la operación a cielo abierto y un modelo de optimización del despacho, el cual reasigna la flota cada cada vez que un evento importante ocurre durante la simulación (eventos como fallas de equipo y cambios en el plan), generando un nuevo despacho en tiempo real. Lo anterior se puede esquematizar de la siguiente manera:

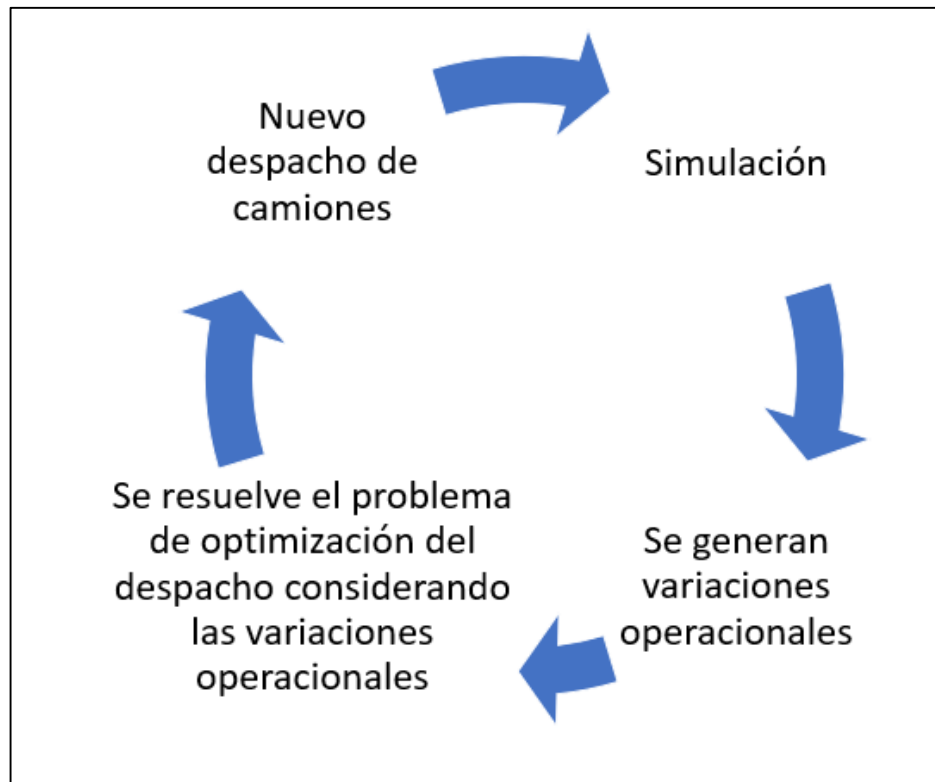


Figura 1-1: Diagrama de modelo integrado de simulación y optimización.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar potenciales mejoras del sistema de despacho, mediante la utilización de modelos de optimización matemática.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar e implementar un programa matemático para el despacho de camiones.
- Integrar el modelo de optimización en uno de simulación.
- Comparar el modelo respecto a la simulación tradicional, en base a índices operacionales y movimiento total de material.

1.2. Alcances

Los alcances de este trabajo son:

- En el modelo de simulación no se considerarán otros equipos además de palas y camiones.
- El manejo de materiales y procesos posterior al chancado no forma parte del estudio, al igual que el ingreso de insumos y carga de combustible de los equipos.
- Los chancadores no presentan fallas en la simulación.

1.3. Contenidos por capítulo

El presente trabajo está organizado en nueve capítulos más anexos.

El capítulo 1 contiene la introducción al tema desarrollado, y en él se definen los objetivos y alcances del trabajo.

El capítulo 2 muestra los antecedentes bibliográficos utilizados como referencia para este trabajo. Se realiza una revisión general sobre la minería a cielo abierto, planificación minera, estrategias de despacho, caracterización de la incertidumbre y simulación de eventos discretos aplicada a minería.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada que permite obtener los resultados de este trabajo.

En el capítulo 4 se describe el desarrollo del modelo de optimización del despacho de camiones, a modo de poder integrarlo a la simulación

En el capítulo 5 se muestra la generación del modelo de simulación considerando sus principales componentes. Además, se detalla la integración entre la simulación y la optimización, como también se describen los tipos de despacho a simular.

En el capítulo 6 se presenta un ejercicio de simulación sintético en el corto y mediano plazo, en donde se aplica la metodología propuesta.

El capítulo 7 se presenta un ejercicio de simulación basado en un caso real en el corto plazo, en donde se aplica la metodología propuesta.

En el capítulo 8 se presentan las principales conclusiones de este trabajo y, además, se plantean las recomendaciones con el objetivo de generar una extensión de trabajos futuros.

Finalmente, en el capítulo 9 se presenta la bibliografía utilizada para la generación de este trabajo.

2 ANTECEDENTES

2.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto es el proceso de extracción de un depósito mineral cercano a la superficie, típicamente metálico o no metálico. Este método permite la producción de recursos minerales a bajo costo que hacen posible acceder a la extracción de depósitos metálicos con leyes que decrecen en el tiempo. Además, da lugar a la utilización de sistemas mecanizados con equipos de producción masiva, siendo una actividad intensiva en capital. (Hartman & Mutmanský, 2002).

El esquema de la Figura 2-1 muestra una típica mina a cielo abierto de explotación de minerales metálicos, como depósitos de minerales de cobre. La excavación se realiza mediante la construcción de bancos (*bench*), que permiten el avance en profundidad manteniendo la estabilidad geotécnica de las paredes de la mina. La sobre excavación (*overburden*) se refiere al material que debe ser excavado para dar acceso al mineral con leyes económicamente atractivas (*ore*). El acarreo de material dentro de la mina requiere de rampas de acceso (*ramp*) y caminos (*haulage road*) que permitan la circulación de los equipos de transporte entre los distintos sectores.

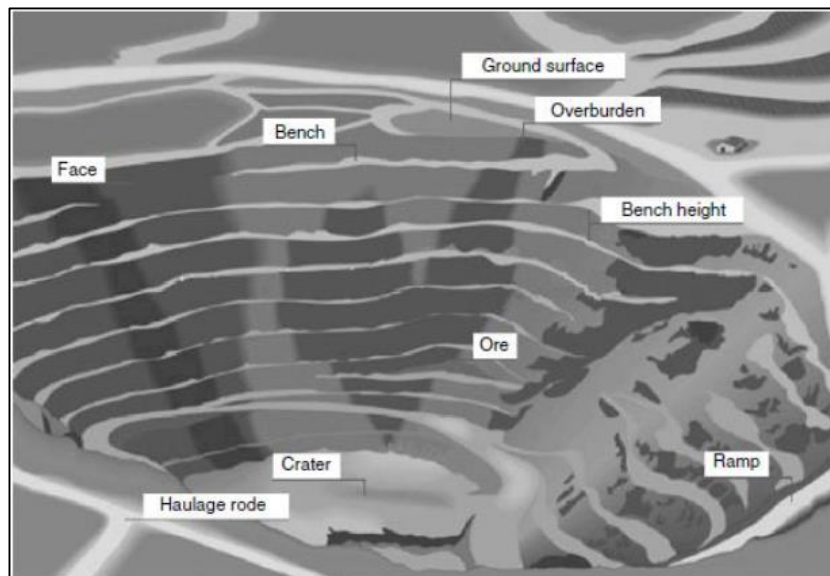


Figura 2-1: Esquema de una mina a cielo abierto. (Newman et al., 2010).

El ciclo de producción en minería a cielo abierto utiliza operaciones unitarias que generalmente involucran perforación, tronadura, carguío y transporte.

En minería a cielo abierto, los pozos de tronadura son construidos por una máquina perforadora, donde se insertan y detonan explosivos con la finalidad de reducir de tamaño el material a un calibre adecuado para ser minado. El material fracturado es cargado por palas, dragas o cargadores frontales en los equipos de transporte (generalmente camiones), con la finalidad de ser transportado a chancadores, pilas de lixiviación, *stocks* o depósitos de material estéril (botaderos).

El ciclo de los equipos de transporte en minería a cielo abierto comprende las etapas de carga, viaje a sitio de vaciado, descarga, viaje a sitio de carga, espera en cola y posicionamiento (o aculatamiento), para ser nuevamente cargado. El tiempo que toma un ciclo de camión se mide considerando todas las etapas mencionadas. La Figura 2-2 muestra de manera esquemática el ciclo de un camión.

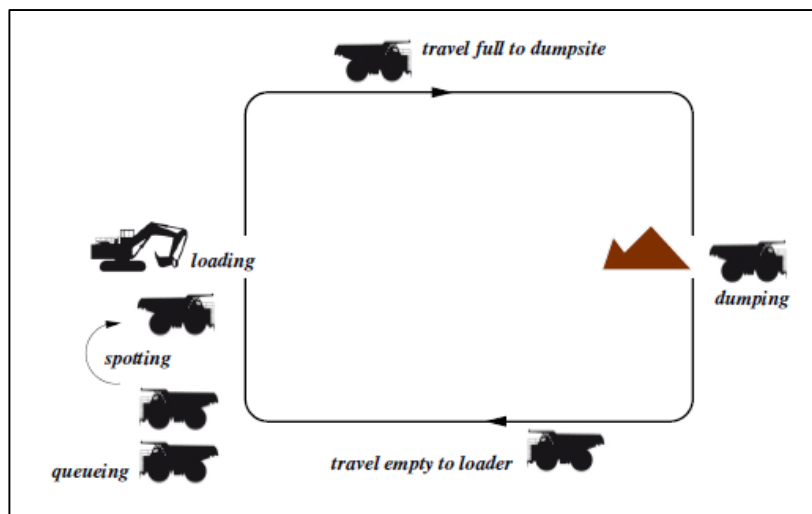


Figura 2-2: Ciclo del camión en minería a cielo abierto. (Burt & Caccetta, 2013)

2.2. Planificación minera

La planificación minera a cielo abierto puede ser definida como el proceso de encontrar una secuencia factible de extracción de material que genere el máximo beneficio, sujeto a restricciones operacionales y técnicas (Whittle, 1989).

Es posible separar en niveles el proceso de planificación, de acuerdo a las características de las decisiones tomadas, en (Newman et al., 2010):

- **Estratégicas:** Se refieren a la elección de los métodos de explotación, capacidad mina, procesamiento y, en general, las estimaciones de reservas mineras. El principal objetivo de la planificación estratégica es sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía.
- **Tácticas:** Corresponden a la especificación de los procesos a realizar a lo largo de la vida de la mina, como los programas de producción de largo plazo y los modelos de programación para la utilización de equipos y plantas de procesamiento. La planificación táctica o conceptual determina la forma de alcanzar el objetivo establecido previamente por la planificación estratégica. Su resultado es el plan minero, que define el cómo y el cuándo se extraerán los recursos, estableciendo los recursos humanos y materiales a utilizar.
- **Operativas:** Se realizan con frecuencia diaria, por ejemplo, dirección de despacho de un camión. Dentro de la planificación operativa se incluyen los procesos e índices operativos resultantes del plan minero. Es aquí cuando se produce la retroalimentación con la planificación conceptual .

Los planificadores mineros deben tomar decisiones del cuándo y cuánto rendimiento se debe tener en una extracción de mineral (Newman et al., 2010). Estas decisiones consisten en determinar cuánto mineral se recuperará y qué hacer con dicho mineral, incluyendo otro tipo de decisiones, como determinar los equipos que se usarán para extraer material, su cantidad y dónde posicionarlos.

2.2.1 Horizontes de planificación

La planificación minera se puede distinguir, según el nivel de detalle y el grado de información que abarcan, en tres categorías (Johnson, 1968).

- **Planificación de largo plazo:** En esta etapa se define el límite económico del pit final, es decir, define el tamaño y profundidad del rajo para el final de su vida. El plan de largo plazo se ajusta a la visión estratégica de la compañía y se analiza año a año.
- **Planificación de mediano plazo:** Se encarga de definir la secuencia y el agendamiento de extracción de material, guiando las condiciones iniciales del depósito hacia el pit final del rajo. Aquí se busca definir la extracción en periodos que van desde meses hasta años.
- **Planificación de corto plazo:** Se preocupa de la operación presente, funciona como la guía para los operadores que los conduce a alcanzar los objetivos de producción del mediano plazo. Está sujeto a las condiciones y restricciones bajo las que se encuentre la operación. El periodo de planificación es usualmente un año con etapas de meses, semanas o días.

2.3. Incertidumbre operacional

La cuantificación de la incertidumbre operacional en sistemas de manejo de materiales en faenas a cielo abierto ha sido abordada por numerosos autores. En la literatura predominan los estudios que tratan de cuantificar la influencia de la política de despacho de camiones en los resultados del sistema.

A lo largo de las lecturas de la revisión bibliográfica, se puede observar que las técnicas utilizadas para representar la naturaleza estocástica de los parámetros operacionales corresponden a modelar dichos parámetros como distribuciones de probabilidad, los que posteriormente alimentarán a un modelo de simulación. Por otra parte, para representar los cambios de estado en la disponibilidad de equipos de carga y transporte, la literatura asume directamente distribuciones de probabilidad para el tiempo entre fallas (*time between failures*, TBF) y el tiempo para reparar (*time to repair*, TTR). Se debe señalar que, al representar la disponibilidad de los equipos, mediante

tiempos entre fallas y tiempos de reparación, no se está considerando la existencia de mantenimientos programadas de los componentes mineros, cuyo inicio y duración se conocen de antemano.

2.4. Simulación de eventos discretos

La simulación es una técnica numérica implementada para realizar experimentos mediante un computador. Dichos experimentos utilizan ciertas relaciones lógico-matemáticas, las cuales describen el comportamiento y estructura de sistemas complejos a través de ciertos periodos, por lo que es una imitación de un proceso real en el tiempo, que implica la generación y observación de una historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está representando (Banks, 1984).

Existen distintos tipos de simulación, y dentro de ellas se tiene la simulación de eventos discretos (DES en inglés), la cual consiste en relacionar ciertos eventos por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas.

La simulación es una herramienta que puede aplicarse en el campo de la ingeniería de minas para la evaluación de desempeño de sistemas mineros complejos, tanto en minas a cielo abierto como subterráneas. Dentro de las evaluaciones importantes que se pueden realizar se encuentran las interacciones internas entre equipos, utilización de equipos y la producción del sistema global.

Dentro de los elementos clave que se deben tener en cuenta para el éxito de un modelo de simulación según García et al. (2006) se encuentran cantidad de réplicas, duración de la réplica, variables de respuesta, relaciones entre variables, distribución de las variables aleatorias y el uso de la información. Cabe destacar que la simulación presenta posibles ventajas y desventajas:

Ventajas

- Es una buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, lo cual puede ser riesgoso y/o costoso.
- Mejora el conocimiento del proceso actual, ya que le permite al analista ver cómo se comporta el sistema bajo distintos escenarios.
- Puede utilizarse como una herramienta complementaria para la toma de decisiones.

- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución cuando se quiere relacionar distintas variables y conocer su impacto en una variable final.
- En la actualidad, los *software* de simulación tienden a ser más sencillos en términos de que no se requiere un conocimiento extenso de programación.
- Contar con una interfaz gráfica permite ver cómo se comportará un proceso una vez que se haya cambiado o mejorado.

Desventajas

- La simulación no es una herramienta de optimización, a pesar de que algunos *software* tengan integrados paquetes que permiten utilizar la optimización para mejorar los distintos escenarios simulados.
- La simulación puede ser costosa cuando se quiere implementar en problemas relativamente sencillos de resolver.
- Para generar un buen estudio de simulación se requiere de una inversión alta de tiempo de trabajo.
- Es necesario que el analista domine el uso de software y que maneje conocimientos de estadística para el análisis de resultados.

2.4.1 Generación de modelo de simulación

La metodología utilizada para el modelo de simulación consta de 11 etapas principales, la cual fue elaborada por Banks (1999). Dichas etapas son explicadas a continuación:

1. Formulación del problema

La formulación del problema define los elementos básicos de un proyecto, tales como sus objetivos y alcances. Se abarcan todos los aspectos claves del mismo y se acota según ciertos límites dados por el análisis que se quiere realizar. En este caso, se requiere estimar la producción de una operación a cielo abierto, considerando un despacho óptimo, cuantificando rendimientos de equipos y pérdidas operacionales en el corto y mediano plazo.

2. Establecimiento de objetivos y plan general del proyecto

Los objetivos indican las preguntas que deben ser respondidas en el estudio de simulación. El plan del proyecto debe incluir una declaración de los distintos escenarios que se investigarán.

3. Modelo conceptual

El modelo conceptual es creado con el objetivo de ser una guía del modelo computacional, por lo que su elaboración sirve para generar la lógica de tareas que la simulación debe cumplir.

4. Recolección y análisis de datos

Esta etapa puede desarrollarse en paralelo a la generación del modelo conceptual. La información puede ser obtenida de distintas fuentes, tales como:

- Opinión de Expertos.
- Bases de datos.
- Toma de datos empíricos.

5. Codificación

La codificación o modelo computacional toma la información obtenida a partir del análisis de datos con el fin de que sea lo más cercano a la realidad o a las condiciones operativas.

6. Verificación del modelo

Consiste en determinar si el modelo está haciendo lo que corresponde, lo cual puede ser analizado observando el comportamiento de ciertas variables, de los resultados finales de la simulación o de una validación del sistema en movimiento.

7. Validación del modelo

Es el proceso que sirve para determinar el grado de semejanza entre el modelo de simulación y la realidad que se pretende representar.

8. Diseño de experimentos

Tras validar el modelo se definirán los escenarios que serán analizados. En esta etapa se define el tiempo de simulación, número de réplicas y punto de inicio del problema.

9. Corridas de producción y análisis

Las corridas o réplicas y sus posteriores resultados son usados para medir el rendimiento de cada uno de los escenarios que desean estimarse. Estos resultados deben determinar si la cantidad de réplicas fueron suficientes o no.

10. Documentación del programa y reporte de resultados

Finalmente, se debe realizar el reporte de resultados junto con el análisis en base a los objetivos del proyecto. Posteriormente, si el modelo de simulación está validado, se puede implementar a distintos casos de estudio.

11. Implementación

Los resultados de la simulación deben ser considerados como un reporte, es decir, los resultados obtenidos deben ser considerados como información extra que servirá para tomar alguna decisión.

Un diagrama que resume todas las etapas para construir un modelo de simulación se puede apreciar en la Figura 2-3.

Por otro lado, se debe señalar, que las principales aplicaciones que tiene la simulación en minería corresponden al modelamiento del sistema de transporte de materiales, donde por lo general se busca establecer el rendimiento de la operación, en base al modelamiento de las fallas y mantenciones de los equipos utilizados.

Finalmente, se debe señalar que si bien, la simulación de eventos discretos es una herramienta poderosa para emular comportamientos de sistemas complejos, no es una herramienta

que optimice el escenario la operación, por lo que insertar un modelo de simulación dentro de la simulación, puede significar una mejor significativa en el sistema.

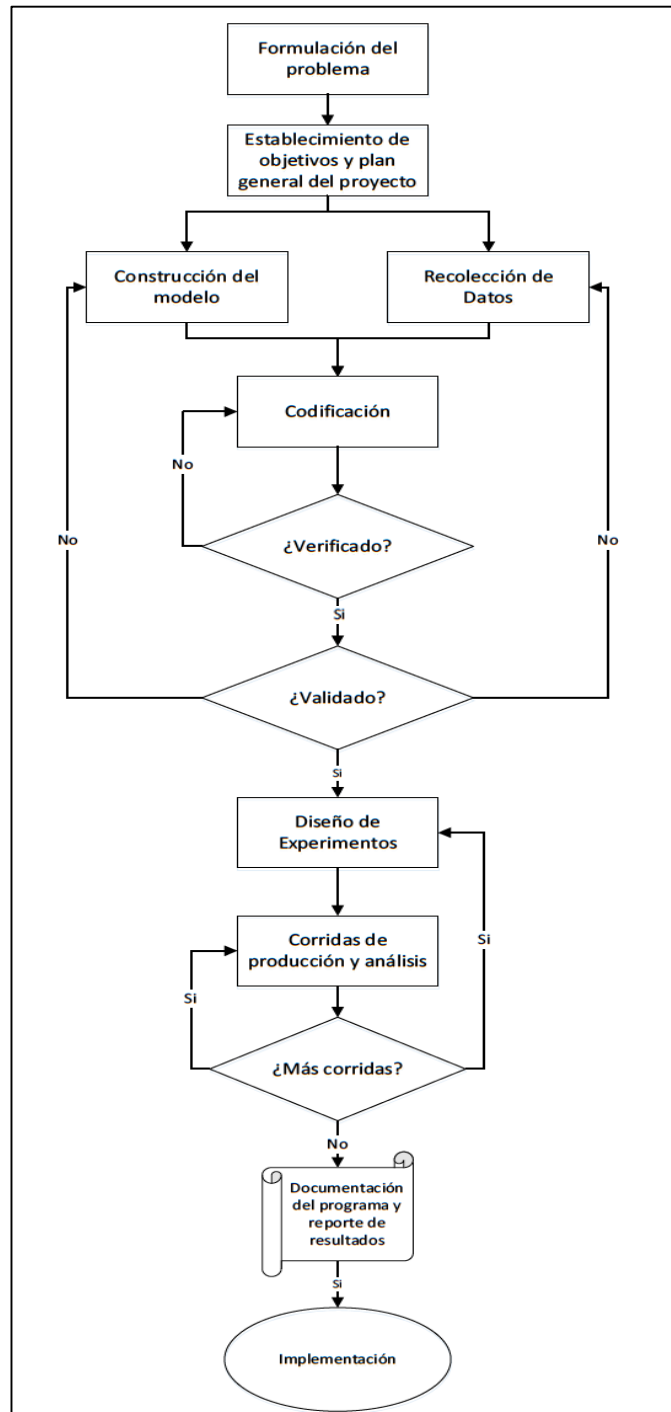


Figura 2-3: Etapas para la construcción de un modelo de simulación. (Banks, 1999).

2.5. DSIM

2.5.1 DSIM Open Pit

DSIM Open Pit (en adelante DSIM OP) es una herramienta de planificación que permite estimar la producción de un plan minero a partir de los siguientes tres elementos básicos: el *layout* de la mina (frentes de carga y descarga, rutas), la flota de equipos de carga y transporte y un plan minero que indica cuánto se desea enviar desde cada frente a cada potencial destino. A partir de estos elementos, DSIM OP realiza simulaciones de eventos discretos del sistema de manejo de material, entregando reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo.

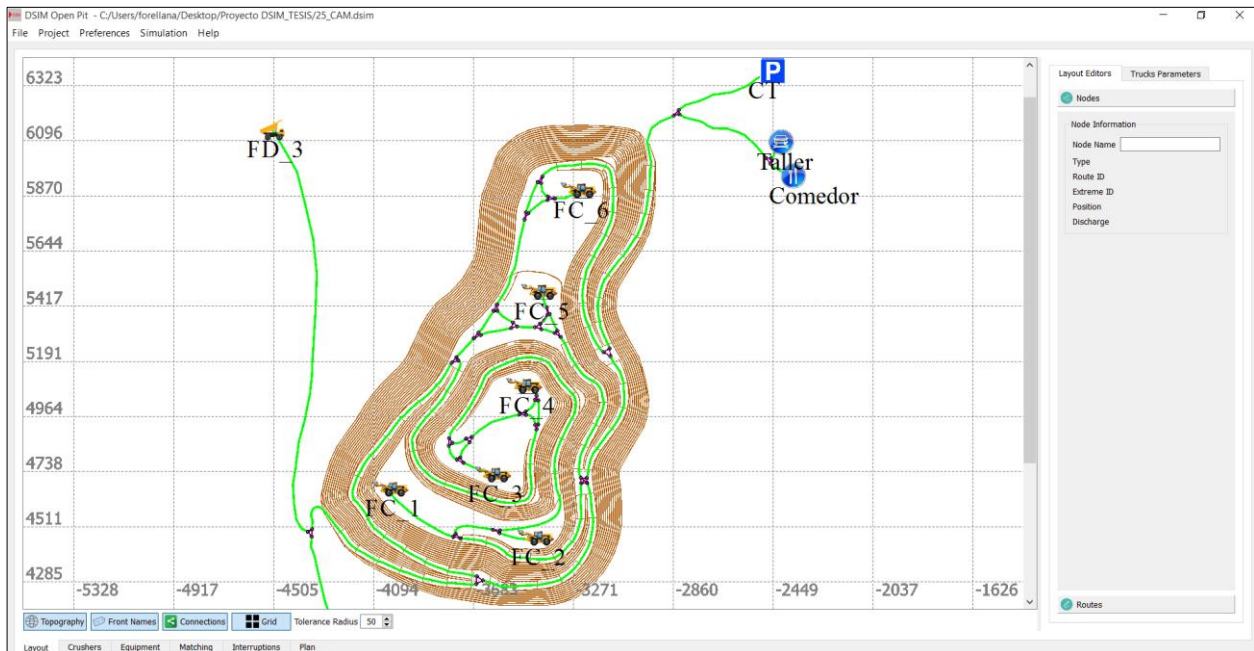


Figura 2-4: Interfaz gráfica de DSIM Open Pit.

El simulador ha sido principalmente utilizado en minería a cielo abierto, donde se han desarrollado estudios de cálculo de productividad de camiones (convencionales y autónomos), de palas y análisis de tiempos de operación, cuyos resultados han sido validados por la industria al realizar simulaciones de corto plazo, en Divisiones de CODELCO como Gabriela Mistral, Radomiro Tomic y Andina, además de operaciones como Escondida en el caso de BHP Billiton. Por otro lado, debido a que es un software programado por los desarrolladores del Laboratorio de

Planificación Minera DELPHOS, permite también el estudio de nuevas estrategias integradas al movimiento de material, como lo son condiciones ambientales (nieve), que pueden inhabilitar los caminos por donde se movilizan los camiones de extracción, o sistemas de manejo de material distinto como *In-pit Sizing and Conveying (IPSC)*, *In pit Crusher and Conveying (IPCC)*, *High Angle Conveying (HAC)*, etc.

Una de las principales ventajas de DSIM OP es que permite al usuario modelar de manera sencilla la operación de una mina a cielo abierto. Finalmente, se debe mencionar que el *software* ha sido validado sólo en instancias de estudio para minería a cielo abierto, a diferencia de su versión subterránea, la cual se encuentra en etapas de desarrollo inicial (Pérez, 2017).

2.5.2 DSIM Core

Corresponde a la biblioteca de simulación de DSIM OP, la cual contiene todos los objetos genéricos de simulación. Esta versión está basada totalmente en código *Python*, donde los objetos y eventos de simulación se obtienen de la biblioteca *Simpy*, y su utilización a nivel de usuario está dada en un 100% por programación en código.

Para el desarrollo del trabajo se utiliza principalmente esta versión, debido a que DSIM OP tiene un despacho programado que no se puede modificar. Como uno de los objetivos de esta tesis es comparar distintas estrategias de despacho, se debe programar una parte de los elementos preexistentes del DSIM OP y, además, se deben programar las nuevas estrategias de despacho.

2.6. Estrategias de despacho de camiones en minería a cielo abierto

Existen diversas estrategias de despacho descritas en la literatura, que van desde heurísticas considerando reglas simples hasta modelos de optimización considerando todos los requerimientos de la operación. En particular, estas estrategias se pueden agrupar en tres grandes grupos (Alarie & Gamache, 2002), los cuales se describen a continuación.

- **Un camión para n palas:**

Cuando un camión genera un requerimiento de despacho, se consideran las n palas a las que el camión podría ser despachado y el sistema evalúa los costos o beneficios de asignarlo a cada una de las palas de acuerdo a un criterio de selección. Este procedimiento se repite cada vez que un camión requiere ser despachado. Bajo este esquema, no se considera el impacto de la decisión de despacho en las asignaciones futuras. Esta estrategia es la más antigua y una de las más sugeridas en la literatura. En particular, dentro de esta categoría se debería considerar el despacho que actualmente posee el *software* DSIM Open Pit.

- **m Camiones para una pala:**

Las decisiones de despacho se toman considerando los próximos m camiones a ser despachados en el futuro cercano, pero sólo considerando una pala. Primero, las palas son ordenadas en función de qué tan atrasadas se encuentran respecto de la producción calendarizada. Considerando este orden, se asigna a la primera pala de la lista el camión que reducirá esta medida. El sistema de despacho más conocido disponible en la literatura que utiliza esta estrategia corresponde a DISPATCH®, descrito por White & Olson (1986,1992).

- **m Camiones para n palas:**

Considera simultáneamente la asignación de los próximos m camiones a ser despachados a las n palas en operación. Esta estrategia se lleva a la práctica usando métodos de optimización combinatorial. Su principal ventaja es que permite tomar decisiones de acuerdo a una visión global del sistema, que toma en cuenta las relaciones entre los diferentes aspectos del problema. En la literatura esta situación se formula como un problema de asignación o de transporte, ambos problemas clásicos de la investigación de operaciones (Wayne, 2005). Como desventaja, debido a la naturaleza de la optimización combinatorial, los valores de m y n no deben ser muy grandes, ya que de otra forma los tiempos de cómputo para encontrar soluciones podrían aumentar de manera exagerada. Un tipo de despacho que se puede enmarcar en esta categoría corresponde al descrito por Mena et al. (2013), el cual es simulado en este trabajo.

Alarie y Gamache (2002), además plantean que un sistema de despacho ideal debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Deben estar basados en multi-etapas de decisión.
- El algoritmo debe tener en cuenta todas las restricciones de la operación, y debe tener en cuenta la factibilidad de sus soluciones.
- Debe tener un mayor control y redefinición de la flota según objetivos en tiempo real.

Un sistema de despacho debe ser capaz de adaptarse rápidamente ante cualquier cambio ocurrido en la operación de la mina, tal como la detención de una pala. La actualización del sistema debe incluir no sólo el estado actual de la mina, sino que también los eventos futuros de los que se tiene conocimiento. Adicionalmente, el continuo aumento de la capacidad y reducción de costo de los computadores, y el constante desarrollo de métodos de investigación operativa, permiten considerar de mejor manera la naturaleza combinatorial del problema de despacho de camiones integrando secuencias de decisiones. De esta manera, es posible evitar el uso de sistemas cuya formulación se basa en problemas de asignación o transporte y considerar formulaciones más generales que permitan evaluar posibles interacciones entre camiones despachados desde distintas posiciones, que puede variar de manera significativa los tiempos de espera de los camiones entre una asignación y otra (Sáez, 2014).

Por otro lado, dentro de la investigación de Çetin (2004), se incluye una completa revisión bibliográfica de heurísticas de despacho de camiones en un sistema de manejo de materiales en una faena a cielo abierto y, además, se desarrolla un modelo de simulación para comparar las distintas políticas de despacho en términos de producción total. Su conclusión principal es que no existe evidencia estadística de que una heurística particular domine a las otras en términos de producción del sistema. Es importante mencionar que el caso de estudio desarrollado por Çetin se basa en una mina hipotética y asume distribuciones normales para los tiempos de carga, descarga, tiempos de viaje en carga, tiempos de viaje en descarga. Los parámetros de las variables aleatorias son asumidos arbitrariamente, lo que podría no estar alineado con la variabilidad real de los parámetros operacionales.

2.7. Norma ASARCO

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

2.7.1 Definición de tiempos

- **Nominal:** Espacio de tiempo en que se produce la medición, correspondiente al espacio muestral. Depende del tiempo de continuidad de la producción en la faena.
- **Fuera de servicio:** Espacio de tiempo en que el equipo no se encuentra disponible, tanto sea por una mantención programada o falla en que haya incurrido.
- **Disponible:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra capacitado de realizar tareas.
- **Reserva:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para realizar alguna tarea, pero que por alguna condición específica no está siendo utilizado.
- **Operativo:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para realizar tareas y cumple con actividades asociadas a la operación.
- **Demoras programadas:** Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero donde se deben cumplir ciertas actividades normadas por la ley, como lo son los cambios de turno o tiempos de colación.
- **Demoras no programadas:** Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero que ocurren debido a condiciones o circunstancias propias de la operación, o ineficiencias de ésta.
- **Pérdidas operacionales:** Espacio de tiempo en que el equipo no realiza las tareas para las que fue diseñado, debido principalmente a tiempos de espera del equipo.
- **Efectivo:** Espacio de tiempo en que el equipo realiza las tareas acordes a su funcionalidad.

Tiempo Nominal				
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio
				Prog.
Tiempo Operativo			Reservas	
Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras		
		Prog.	No Prog.	

Figura 2-5: Distribución de tiempos según norma ASARCO.

Existen ciertos indicadores de tiempo que derivan de la norma ASARCO, los que corresponden a:

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

$$\% \text{ Disponibilidad} = \frac{\text{Hrs. Nominales} - \text{Hrs. Mantención/Reparación}}{\text{Hrs. Nominales}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

- **Utilización (Base nominal):** Es el porcentaje sobre las horas nominales en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Corresponde a la división entre el número de horas efectivas y horas nominales. Sirve para establecer la eficacia de la operación mina respecto del uso eficiente que se le da a la flota, equipo, máquina o instalación.

$$\% \text{ Utilización (Base nominal)} = \frac{\text{Hrs. Efectivas}}{\text{Hrs. Nominales}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

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

$$\% \text{ Utilización (Base disponible)} = \frac{\text{Hrs. Efectivas}}{\text{Hrs. Disponibles}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

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

$$\% \text{ Utilización operativa} = \frac{\text{Hrs. Operativas}}{\text{Hrs. Disponibles}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

- **Factor de utilización:** Es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas.

$$\% \text{ Factor Utilización} = \frac{\text{Hrs. Efectivas}}{\text{Hrs. Operativas}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

2.8. Programación Lineal

La programación lineal es una técnica de modelamiento matemático diseñada para optimizar el empleo de recursos limitados. Se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables, lo cual está sujeto a una serie de restricciones que se expresan en forma de inecuaciones y/o ecuaciones lineales (Valdez & Orosco, 2011). El problema se considera lineal si es que tanto la función objetivo y las restricciones son lineales, es decir, cumplen con las propiedades de proporcionalidad y aditividad.

Los elementos básicos que un problema de programación lineal (PPL) debe incluir son los siguientes:

- **Variables:** lo que se busca determinar.
- **Objetivo:** lo que se busca optimizar.
- **Restricciones:** lo que se debe cumplir.

Un problema genérico puede representarse según la ecuación (2.6):

$$\begin{aligned} \max Z &= c^T x \\ \text{s. a } &\begin{cases} Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

En donde:

A = Matriz de $m \times n$

c, x = Pertenecen a \mathbb{R}^n

b = Pertenece a \mathbb{R}^m

Este tipo de herramientas matemáticas han sido utilizadas en la industria minera desde la llegada de computadoras con mayores capacidades de cómputo, lo cual se debe a que los problemas que se desean resolver contemplan una gran magnitud de variables.

2.8.1 Programación lineal aplicada en minería

Las aplicaciones de programación lineal en minería son extensas y abarcan diferentes ámbitos de la mina: operación, planificación, selección de equipos, etc. En particular, muchos modelos de selección de equipos y de rutas utilizan optimización para determinar las flotas y la ubicación en la cual operan (Newman et al., 2010). A continuación, se comentarán algunos trabajos interesantes realizados respecto a esta tesis.

Weintraub (1987) utilizó la estructura de redes para el desarrollo de programación lineal basada en una heurística para determinar las rutas de camiones con distintas capacidades, con el objetivo de minimizar el tiempo de espera de los cargadores para la extracción de mineral y estéril desde la mina. El autor utilizó los tiempos de carga, descarga y transporte de material, así como la red de transporte como base para obtener la solución del algoritmo. Este modelo resultó en un aumento productivo en la división de Chuquicamata, cercano al 8%.

Por otro lado, Soumis (1989) también resolvió un modelo por partes. En resumen, buscaba maximizar la productividad de camiones y palas mientras cumplía con los requerimientos de demanda. Primero determinaba la localización de las palas, para luego utilizar los modelos de redes y, de esta manera, establecer el plan óptimo de producción considerando tiempos de espera. Finalmente, resolvía un modelo de asignación en tiempo real, para despachar los camiones en la mina.

Por último, Najor (2006) utilizó teoría de colas para modelar estocásticamente el comportamiento del sistema pala-camión. En su trabajo, se registraba la productividad de los

equipos dada la carga útil del camión, tasa de alimentación y tiempos de ciclo. El modelo analiza el tiempo que los camiones se encuentran inactivos y predice los horarios de menor alimentación a planta. De esta manera, se obtienen resultados en la mina Pilbara en Australia, los cuales muestran que ignorar las colas genera una sobreestimación de la producción cercana a un 8%.

2.8.2 Modelo de optimización de despacho

La generación de un plan de producción, así como las decisiones en relación a los recursos que se utilizará para alcanzar ese plan ha sido abordado generalmente de manera separada en la literatura, a pesar de que en la realidad esas decisiones están conectadas. El problema consiste en determinar el tamaño y tipo de flota a utilizar, lo cual es determinado por las características geológicas de la mina y la capacidad de los equipos. Los problemas operacionales relacionados con la localización de los equipos en el espacio se aterrizan en el desarrollo de estrategias de despacho y secuenciamiento. Estas decisiones están basadas, por lo general, en rutas de acarreo y en las limitaciones de los equipos. Para este fin se han desarrollado modelos estocásticos y determinísticos (Newman et al., 2010).

El modelo de optimización utilizado es una extensión del modelo propuesto por Mena et al. (2013), el cual corresponde a un modelo de optimización que busca maximizar la productividad de la flota de camiones dentro de un circuito de n puntos de carga y m puntos de descarga, el cual obtiene por resultado la asignación de cada camión a un par origen-destino, lo cual se entiende como el despacho de la flota de camiones que maximiza la productividad. A modo ilustrativo, se puede observar la asignación de camiones a los distintos frentes de carga y descarga en la Figura 2-6.

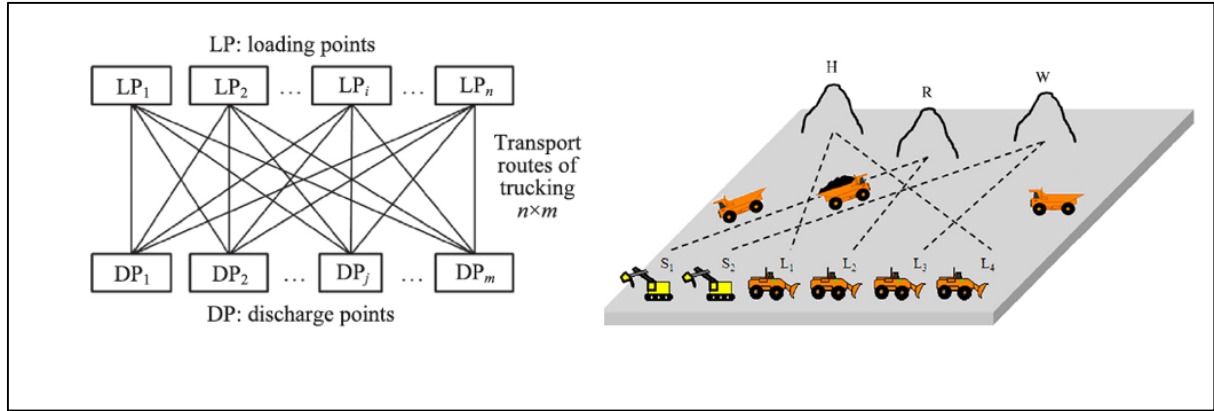


Figura 2-6: Esquema de frentes de carga y descarga. (Mena et al., 2013)

Por otro lado, se debe considerar conceptualmente que la productividad de un equipo corresponde a la cantidad de material que puede transportar o mover en un tiempo determinado. Formalmente se definen las productividades de los equipos de carguío y transporte en las ecuaciones (2.7) y (2.8) respectivamente (Mena et al., 2013) .

$$P_i = \frac{L_i}{t_i} \cdot \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (2.7)$$

Donde:

P_i = Productividad del equipo de carguío i [t/h].

L_i = Carga promedio del equipo de carguío i [t].

t_i = Tiempo de carguío [h].

$MTBF_i$ = Tiempo promedio entre fallas del equipo de carguío i [h].

$MTTR_i$ = Tiempo promedio para reparar equipo de carguío i [h].

$$P_{k[i,j]} = \frac{L_k}{t_{ik} + t_{jk} + d_{ij} \left(\frac{1}{V_{k[i,j]}^L} + \frac{1}{V_{k[i,j]}^U} \right)} \cdot \frac{MTBF_k}{MTBF_k + MTTR_k} \quad (2.8)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ = Productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

L_k = Carga promedio del camión k [t].

t_{ik} = Tiempo de carga del camión k en frente de carga i [h].

t_{jk} = Tiempo de descarga del camión k en frente de descarga j [h].

d_{ij} = Distancia entre el frente de carga i y frente de descarga j [km].

$V_{k[i,j]}^L$ = Velocidad del camión k cuando está cargado [km/h].

$V_{k[i,j]}^U$ = Velocidad del camión k cuando está descargado [km/h].

$MTBF_k$ = Tiempo promedio entre fallas del camión k [h].

$MTTR_k$ = Tiempo promedio para reparar camión k [h].

En las dos ecuaciones se puede apreciar una fracción a la derecha, en la cual se consideran los tiempos promedios entre falla y reparaciones, donde este cociente, según la norma ASARCO, correspondería a la disponibilidad del equipo. Lo anterior representa en esencia que la productividad calculada del equipo corresponde al largo plazo.

El problema de optimización que maximiza la productividad de la flota (Mena et al., 2013) se puede observar en el problema de optimización (2.9):

$$\max \sum_k \sum_i \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} \quad (2.9)$$

$$\sum_k \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} \leq P_i \quad \forall i \in I \quad (2.10)$$

$$\sum_k \sum_i P_{k[i,j]} T \geq M_j \quad \forall j \in J \quad (2.11)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.12)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } k = k' \quad k' \in K \quad (2.13)$$

$$\sum_k \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } i = i' \quad i' \in I \quad (2.14)$$

$$X_{k[i,j]} = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ es asignado al circuito } [i,j] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.15)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ = Productividad del camión k en circuito $[i,j]$ [t/h].

$X_{k[i,j]}$ = Variable de decisión binaria.

P_i = Productividad del equipo de carguío i [t/h].

T = Tiempo de análisis [h]. (Se utiliza por defecto $T=24$ [h])

M_j = Tonelaje requerido en destino j .

I = Conjunto de frentes de carga.

J = Conjunto de frentes de descarga.

K = Conjunto de equipos de transporte.

El significado de cada una de las restricciones corresponde al siguiente:

- (2.10) La productividad esperada de los equipos de carguío en el cargador i no puede exceder la productividad del cargador i .
- (2.11) La producción esperada en el frente de descarga j debe ser mayor o igual que el valor planificado en ese mismo destino. Esto se realiza con el fin de cumplir el plan minero.
- (2.12) Se utiliza esta restricción para que el equipo de carguío sea asignado, a lo más, a un circuito $[i, j]$.
- (2.13) Si el camión k' no se encuentra disponible, se debe agregar esta restricción al problema debido a que se debe forzar a que este equipo no puede ser utilizado.
- (2.14) Si el equipo de carguío i' no se encuentra disponible, se debe agregar esta restricción al problema debido a que se debe forzar a que este equipo no puede ser utilizado.

Se debe mencionar que las restricciones (2.10), (2.11) y (2.12) corresponden a restricciones estáticas del problema, mientras que las restricciones (2.12), (2.13) y (2.14) son restricciones dinámicas, las cuales se modifican en función del estado de la flota de carguío y transporte en un momento determinado.

Finalmente, se debe señalar que, si bien el modelo es bastante completo en términos de las restricciones, existen ciertas limitantes que hacen que no siempre tenga solución (ej. Si todos los camiones fallan, el problema resulta infactible), así como también no permite el análisis de un menor número de camiones, o considere en tiempo real la posición de los camiones en la simulación, por lo que existen mejoras a realizar en este modelo, las cuales eventualmente pueden permitir un mejor desempeño

2.9. Tipos de despacho a simular

En el desarrollo de la tesis se programan dos tipos despacho en base a un problema de optimización y además se utiliza el *software* DSIM Open Pit que posee otro tipo de despacho (el cual ha sido validado en distintos proyectos de simulación, con faenas pertenecientes a Codelco y

BHP Billiton), por lo que en total se analizan 3 tipos de despacho distintos para ver la productividad que pueden alcanzar en la operación, los cuales son los siguientes:

2.9.1 Optimización continua.

Este tipo de despacho considera el problema de optimización del despacho que maximiza la productividad definido por las ecuaciones (2.9) -(2.15) con algunas modificaciones que se describirán en desarrollo del modelo de optimización, en las secciones posteriores. La forma en que opera este despacho consiste en que inicialmente se realiza una asignación resolviendo el problema de optimización y cada vez que eventos como fallas de equipo, reparaciones y variaciones del *layout* ocurren en la simulación, se resuelve nuevamente el problema, considerando las condiciones actuales de la mina.

2.9.2 Optimización inicial

Este despacho considera el problema de optimización del despacho que maximiza la productividad, pero éste se resuelve inicialmente y no se ejecuta nuevamente, por lo que se mantiene la asignación de los camiones fija durante la simulación. Se debe mencionar que existe una excepción en que se debe recalcular el problema, la cual ocurre cuando la pala cambia de frente de carga durante la simulación, o cambia su destino (ej. Comienza a extraer estéril en un frente de carga en el cual se estaba extrayendo mineral producto del cumplimiento del plan). Finalmente se debe señalar que tanto este despacho como el de optimización continua se simulan en DSIM Core, mientras que el despacho priorizado se simula directamente en DSIM Open Pit.

2.9.3 Despacho priorizado

Corresponde al despacho que utiliza el *software* DSIM Open Pit el cual no resuelve ningún problema de optimización e intenta saturar los equipos de carguío por medio de criterios de distancia y prioridad. El *software* tiene como *input* la productividad en el frente de carga, además de la prioridad de dicho frente. Inicialmente ningún camión está asignado a los equipos de carguío, por lo que comienzan a asignarse de forma secuencial, verificando si es que la pala no está saturada y la prioridad de ésta.

Al asignar un camión a una pala, éste comienza a saturarla productivamente y esta productividad está dada por la ecuación (2.16) :

$$P_{k[i,j]} = \frac{L_k}{t_{ciclo[i,j]}} \quad (2.16)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ = Productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

L_k = Carga promedio del camión k [t].

$t_{ciclo[i,j]}$ = Tiempo de ciclo del circuito $[i, j]$ [h]

Se seguirán asignando camiones hasta que la productividad de la flota asignada sea mayor que la productividad *input* del equipo de carguío. Si es que existen varios equipos de carguío sin saturar, la elección se realiza en base a un criterio de prioridad, donde se despacha el camión a la pala que tiene mayor prioridad. Para considerar el efecto de la distancia de los camiones respecto al frente de carga, la prioridad real con que se hace la elección se calcula de la siguiente manera:

$$P_r^R = P_r^I + \left(1 - \frac{d_i}{d_{max}}\right) \quad (2.17)$$

Donde:

P_r^R = Prioridad real.

P_r^I = Prioridad input.

d_i = Distancia al frente de carga i [km].

d_{max} = Distancia máxima a recorrer dentro de la operación [km].

De lo anterior se puede observar que, si 2 palas poseen la misma prioridad *input*, la pala que esté más cercana al camión tendrá mayor prioridad y, por ende, el camión será asignado a ella. Un diagrama simplificado del despacho de DSIM OP se puede observar en la Figura 2-7 :

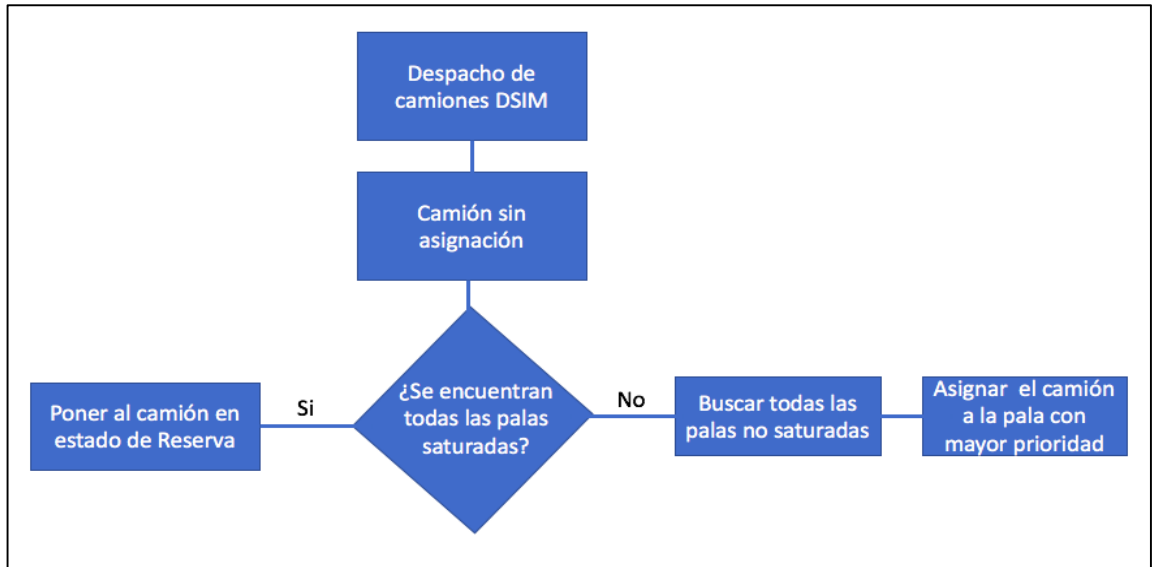


Figura 2-7: Diagrama de despacho DSIM OP.

2.9.4 Criterios de comparación

Los criterios con que se comparan los distintos tipos de despacho son los siguientes:

- Utilización/disponibilidad de flota de carguío y transporte: definidos previamente en norma ASARCO.
- Producción diaria promedio: Corresponde al material extraído en la simulación durante un día de trabajo.
- Cumplimiento del plan: Corresponde a la cantidad de mineral extraída en la simulación, respecto al material del plan que se ingresa como input. Este cumplimiento se puede analizar tanto por frente de carga/descarga, como por el total general de la simulación.

$$\% \text{ Cumplimiento} = \frac{\text{Material extraído en sim.}}{\text{Material planificado a extraer}} \cdot 100 \quad (2.18)$$

Se consideran estos factores, debido a que son totalmente imparciales respecto al tipo de despacho, y representan la capacidad productiva del sistema.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología utilizada que permite obtener los resultados de este trabajo, los cuales se presentan en los capítulos 6 y 7.

1. Desarrollo del modelo de optimización.

En primer lugar, se estudia el modelo de despacho que maximiza la productividad definido por Mena et al. (2013), para identificar cuáles son los principales parámetros, establecer formas de resolución y vincular la solución con el modelo de simulación. A partir de esto se obtendrá una asignación inicial de la flota de camiones a los diferentes circuitos de la mina, que servirá como un *input* inicial de la simulación.

2. Desarrollo del modelo de simulación.

A partir de la metodología de generación del modelo de simulación realizada por Banks (1999), se realiza un modelo de simulación que considera equipos de carguío y transporte en minería a cielo abierto. La construcción del modelo considera un despacho modular, el cual se puede cambiar dependiendo de los análisis que se quiera realizar. Con esto se obtiene un modelo de simulación que recibe un despacho genérico y es capaz de estimar la productividad e índices operativos.

3. Desarrollo del modelo integrado.

Una vez definido el modelo de simulación y el modelo de optimización, éstos se vinculan a través del despacho, de manera que se resuelve un problema de optimización considerando las condiciones de la operación en tiempo real. Dependiendo del tipo de estrategia de despacho, la optimización puede realizarse de forma continua cada vez que ocurre un evento operacional, como también puede realizarse sólo al inicio de la simulación. A partir de esto se puede simular en un modelo que integra la simulación y la optimización, con lo que se pueden simular los diferentes casos de estudio.

4. Simulación de casos de estudio.

En primera instancia se realiza la simulación de casos sintéticos, tanto en corto como mediano plazo, para establecer el comportamiento de las diferentes estrategias de despacho en un entorno controlado. De igual manera, se realizan las simulaciones para el caso real y se obtienen los resultados.

5. Comparación de resultados

Una vez obtenidos los resultados, se comparan las distintas estrategias de despacho basándose en índices como utilización y productividad máxima de la operación. Esto se realiza tanto en el corto como mediano plazo, para los diferentes ejercicios analizados.

4 DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

En este capítulo, se describen las principales modificaciones al modelo de optimización del despacho propuesto por Mena et al. (2013), el cual está descrito en la sección 2.8.2. Las modificaciones se realizan principalmente con la finalidad de integrar el modelo de optimización a la simulación.

4.1. Modificación del problema de optimización del despacho

El problema de optimización del despacho que maximiza la productividad propuesto por Mena et al. (2013), es bastante completo en términos de las restricciones aplicadas, permitiendo en gran parte de los casos realizar la simulación y ver el rendimiento de este despacho. Sin embargo, producto de la aleatoriedad de la simulación, se pueden generar situaciones que hacen el problema infactible, por lo que restricciones adicionales deben ser generadas.

Uno de los primeros parámetros del modelo al que hay que poner atención corresponde a las rutas entre el frente de carga i y un frente de descarga j , ya que para el caso del modelo se consideran únicas (ver Figura 2-6). Para el desarrollo de esta tesis también se considera que las rutas son únicas y que éstas rutas corresponden a las más cortas en términos de distancia, por lo que para determinar estas rutas se utiliza el algoritmo de Dijkstra (1959).

La solución del problema de optimización definido por las ecuaciones (2.9)-(2.14) tal como se describe hasta ahora, no garantiza la existencia de soluciones factibles. Lo anterior se puede ejemplificar de manera simple: si se considera una operación que posee 2 equipos de carga y cada uno tiene un destino distinto (ej. Chancador y Botadero) y uno de estos equipos falla, la restricción de *budget* en el destino del equipo no se podría cumplir, y por ende el problema no tendría solución factible. Debido a este motivo se debe modificar la restricción (2.11) de la siguiente manera:

$$\frac{\sum_k \sum_i P_{k[i,j]} T}{M_j} \geq 1 - \mu_j \quad \forall j \in J \quad (4.1)$$

Donde $\mu_j \in [0,1]$ y corresponde a una variable de holgura continua, que representa el incumplimiento porcentual del plan en el destino j , la cual corresponde a una variable adicional a

determinar por el problema de optimización (no es una holgura permitida de antemano) y se utilizará para penalizar los incumplimientos. Debido a que existen destinos que pueden ser más importantes que otros respecto al cumplimiento del plan, se propone utilizar una prioridad λ_j en los destinos (considerando $\lambda_j \in \mathbb{R}^+$), lo cual se puede modelar cambiando la función objetivo del problema a la siguiente:

$$\max \sum_k \sum_i \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} - C \cdot \sum_j \mu_j \lambda_j \quad (4.2)$$

Donde:

C = Constante de productividad [t/h].

μ_j = Variable de holgura de incumplimiento del plan en frente de descarga j .

λ_j = Prioridad del destino j .

Definiendo de esta manera la función objetivo se genera un castigo por alejarse del cumplimiento del plan (no por excederse), además al considerar la restricción (4.1), el problema de optimización tiene una solución factible siempre.

Por otro lado, se puede observar que el problema original no posee una restricción respecto al número de camiones que se pueden utilizar en la flota, por lo que se debe agregar esta restricción para poder realizar análisis de saturación de los frentes de carga en función del número de camiones.

Considerando todo lo anterior, se reescribe el problema original propuesto por Mena et al. (2013), el cual se puede observar a continuación.

$$\max \sum_k \sum_i \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} - C \cdot \sum_j \mu_j \lambda_j \quad (4.3)$$

$$\sum_k \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} \leq P_i \quad \forall i \in I \quad (4.4)$$

$$\frac{\sum_k \sum_i P_{k[i,j]} T}{M_j} \geq 1 - \mu_j \quad \forall j \in J \quad (4.5)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } k = k' \quad k' \in K \quad (4.7)$$

$$\sum_k X_{k[i,j]} \leq N_{camiones} \quad (4.8)$$

$$\sum_k \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } i = i' \quad i' \in I \quad (4.9)$$

$$X_{k[i,j]} = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ es asignado al circuito } [i, j] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ = Productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

$X_{k[i,j]}$ = Variable de decisión binaria.

P_i = Productividad del equipo de carguío i [t/h].

T = Tiempo de análisis [h]. (Se utiliza por defecto $T= 24$ [h])

M_j = Tonelaje requerido en destino j .

I = Conjunto de frentes de carga.

J = Conjunto de frentes de descarga.

K = Conjunto de equipos de transporte.

C = Constante de productividad [t/h].

μ_j = Variable de holgura de incumplimiento del plan en frente de descarga j .

λ_j = Prioridad del destino j

$N_{camiones}$ = Número total de camiones a utilizar.

Desde aquí en adelante para los propósitos de este trabajo, se define el problema de optimización dado por las ecuaciones (4.3)-(4.10), como el problema de despacho que maximiza la productividad en el largo plazo.

4.2. Horizonte de evaluación

El problema de optimización de despacho a largo plazo considera *inputs* de la flota de carguío y transporte además del *layout* de la operación, donde respecto al *layout* se consideran distancias entre puntos de carga y descarga. Sin embargo, no considera la posición de los camiones en el instante en que se resuelve el problema. Como uno de los objetivos del trabajo consiste en realizar el despacho dentro de la simulación, el efecto de no considerar la posición de los camiones puede producir pérdidas productivas debido a la reasignación: por ejemplo, los camiones pueden ser asignados a circuitos muy lejanos, siendo que hay camiones más cercanos a ese circuito.

Debido a lo anterior, se debe considerar la posición de los camiones en el *layout* cuando se resuelve el problema de optimización, por lo que se debe modificar el cálculo de la productividad del camión. Para esto, se debe definir un tiempo de evaluación de productividad, el cual se puede ver en la ecuación (4.11).

$$\mathbf{T}_{\text{evaluación}} = \mathbf{T}_{\text{restante}[i,j]} + \mathbf{T}_{\text{perdido}[i',j']} \quad (4.11)$$

Donde:

$\mathbf{T}_{\text{evaluación}}$ = Tiempo de evaluación de productividad [h].

$\mathbf{T}_{\text{restante}[i,j]}$ = Tiempo que queda para el circuito $[i, j]$ [h].

$\mathbf{T}_{\text{perdido}[i',j']}$ = Tiempo necesario para completar circuito $[i', j']$ y llegar a $[i, j]$ [h].

Para efectos de este trabajo, el tiempo de evaluación corresponde a un *input* y el tiempo perdido se calcula directamente desde la posición que posee el camión en el *layout*. El tiempo perdido considera completar el circuito al que estaba asignado anteriormente el camión (estando cargado o descargado debe cumplirlo), y llegar al frente de carga nuevo. Considerando estos dos tiempos, se puede obtener desde la ecuación (4.11) el tiempo restante para el circuito $[i, j]$. Una vez definido el horizonte de evaluación, se debe redefinir la productividad de la ecuación (2.8), para que la productividad tome en cuenta este tiempo. La productividad de un camión, dado un horizonte de evaluación, se puede observar en la ecuación (4.12).

$$P_{k[i,j]} = \frac{L_k}{T_{\text{evaluación}}} \left(1 + \frac{T_{\text{restante}[i,j]}}{t_{ik} + t_{jk} + d_{ij} \left(\frac{1}{V_{k[i,j]}^L} + \frac{1}{V_{k[i,j]}^U} \right)} \right) \cdot \frac{MTBF_k}{MTBF_k + MTTR_k} \quad (4.12)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ = Productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

L_k = Carga promedio del camión k [t].

t_{ik} = Tiempo de carga del camión k en frente de carga i [h].

t_{jk} = Tiempo de descarga del camión k en frente de descarga j [h].

d_{ij} = Distancia entre el frente de carga i y frente de descarga j [km].

$V_{k[i,j]}^L$ = Velocidad del camión k cuando está cargado [km/h].

$V_{k[i,j]}^U$ = Velocidad del camión k cuando está descargado [km/h].

$MTBF_k$ = Tiempo promedio entre fallas del camión k [h].

$MTTR_k$ = Tiempo promedio para reparar camión k [h].

$T_{\text{evaluación}}$ = Tiempo de evaluación de productividad [h].

$T_{\text{restante}[i,j]}$ = Tiempo que queda para el circuito $[i, j]$ [h].

Dentro del paréntesis de la ecuación (4.12), el valor 1 representa que al menos se cumple con llevar la carga L_k en el circuito anterior dentro del tiempo de evaluación, mientras que el término de la derecha representa la productividad del camión en el circuito $[i, j]$, multiplicado por la fracción del tiempo que resta.

Al resolver el problema de despacho a largo plazo, dado por las ecuaciones (4.3) – (4.10), y considerando la productividad con un horizonte de evaluación (4.12) en vez de la productividad a largo plazo, se define desde aquí en adelante para este trabajo como el problema de despacho que maximiza la productividad con un horizonte de evaluación.

4.3. Consideraciones en la resolución del problema

El modelo de optimización se programa utilizando la librería *PuLP* del lenguaje de programación *Python*, y la hora de resolver el problema se llama al *software* optimizador *Gurobi* para que resuelva el problema, en donde se exige un *gap* de optimalidad de un 1%.

En particular, como esto se realiza muchas veces durante la simulación, producto de la aleatoriedad en las fallas de los equipos, se pueden encontrar escenarios donde el 1% de *gap* es difícil de cumplir y el problema se puede demorar mucho tiempo en resolver (se tienen casos en donde la resolución del despacho tomaba más de una hora, siendo que en general la resolución era instantánea). Debido a este motivo, para este trabajo se fija una regla de resolución simple basada en la experiencia adquirida en la realización misma de este trabajo.

La regla antes mencionada considera que, si el tiempo de simulación del problema entero mixto tarda más de 10 segundos en resolverse, se para el proceso y se resuelve el problema relajado, cuya solución es casi instantánea y desde esta solución se extraen los valores de las variables que tienen un valor mayor a 0.7 en la resolución. Luego, estas variables se fijan con un valor 1 y se añaden como restricción al problema de optimización original, con lo que nuevamente se resuelve un problema entero mixto en un ciclo iterativo.

Esta regla corresponde a un método heurístico de redondeo, el cual se aplica debido a que la resolución del problema de optimización representa un *input* para la simulación, por lo que, si se demora en resolver, no se puede completar la simulación. Por otro lado, se debe mencionar que se consideran 10 segundos para que pueda resolver el problema, debido a que en general se tenían dos escenarios: el problema se resolvía instantáneamente (caso más frecuente) o se demoraba en resolver (del orden de minutos a horas).

5 DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se describen las componentes principales del modelo de simulación como los parámetros que posee y la lógica interna de los equipos. Además, se describe la integración del modelo de optimización con el de simulación y se detallan los tipos de despacho a analizar en las secciones futuras.

5.1. Dinámica operacional del sistema de transporte de materiales

Se define un **objeto** como cada uno de los elementos que existe dentro de la simulación, por lo que para el caso de este trabajo se dividen en equipos, frentes y locaciones. Dependiendo del tipo de objeto se define un **estado operacional**, que es la situación en que se encuentra cada objeto. Estos estados se encuentran totalmente definidos si las siguientes características están designadas:

- **Equipos:** En el caso de los equipos basta conocer la posición y la tarea que está realizando actualmente.
- **Frentes:** En el caso de las frentes, basta saber si tiene un equipo de carguío asignado.
- **Locaciones:** En el caso de las locaciones se requiere saber si existen equipos presentes en el lugar.

Por otro lado, los eventos operacionales se definen como sucesos que provocan que el estado operacional de los equipos cambie. Los eventos pueden ser fallas del equipo, cambio de turno, colación, cumplimiento del plan en el frente de extracción y la finalización del plan.

5.2. Parámetros operacionales

Los parámetros operacionales son datos que describen alguna propiedad de una operación. Dichos parámetros pueden ser valores fijos o venir dados por distribuciones. Los parámetros operacionales utilizados en este trabajo se describen a continuación:

- **Factor de carga:** Cantidad de material que el equipo de carguío carga en el camión.
- **Tiempo de carga:** Tiempo que el equipo de carguío emplea en cargar el camión. No incluye tiempos de aculatamiento ni esperas una vez posicionado el camión.

- **Tiempo de acuatamiento carga:** Tiempo que emplea el camión desde que entra a la locación de carga hasta posicionarse en el punto de carga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
- **Tiempo de descarga:** Tiempo que emplea el camión en descargar su carga actual. No incluye tiempos de acuatamiento en descarga.
- **Tiempo de acuatamiento descarga:** Tiempo que emplea el camión desde que entra a la locación de descarga hasta posicionarse en el punto de descarga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
- **Tiempo de viaje:** Tiempo de viaje entre locaciones de carga y descarga. Se distingue entre tiempos de viaje en estado cargado y descargado.

5.3. Interpretación de la incertidumbre operacional

En la presente sección se realiza una identificación de los tipos de incertidumbre operacional presentes en la minería a cielo abierto.

Asociada a parámetros operacionales: corresponde a aquellos parámetros que tienen relación con tiempos, velocidades y capacidades de los componentes utilizados en la operación.

Asociada a eventos operacionales: corresponde a aquellos que afectan a la efectividad de los equipos, como detenciones programadas y fallas operacionales.

Para generar cierta aleatoriedad, tanto en la incertidumbre asociada a parámetros como a eventos operacionales, se debe caracterizar la incertidumbre mediante estudios estadísticos de datos (Torkamani, 2013).

5.4. Lógica de equipos

Los equipos de simulación en operación corresponden a palas y camiones. En base a la metodología propuesta por Banks (1999) se realiza la lógica de simulación de los equipos en una operación minera a cielo abierto, cuyo diagrama general se puede observar en la Figura 5-1.

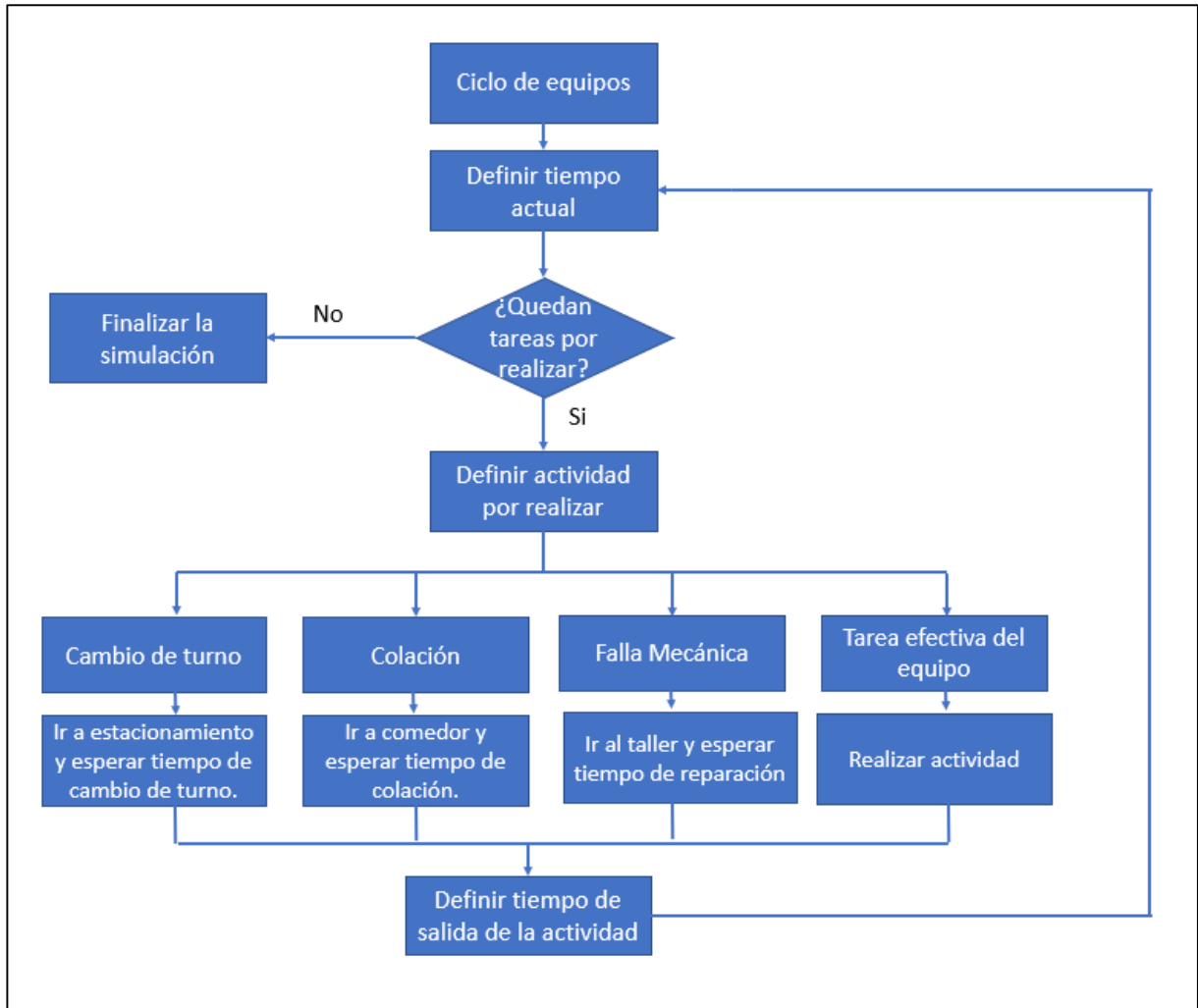


Figura 5-1: Lógica general de equipos de simulación

En el caso de los equipos de carguío, el diagrama anterior posee ciertas excepciones, debido a que la pala no se mueve de su frente de carga, a menos que haya completado el plan y deba moverse, por lo que este equipo no debe ir al estacionamiento, comedor ni taller para realizar estas actividades. El detalle de la lógica de simulación que poseen los camiones se puede apreciar en la Figura 5-2.

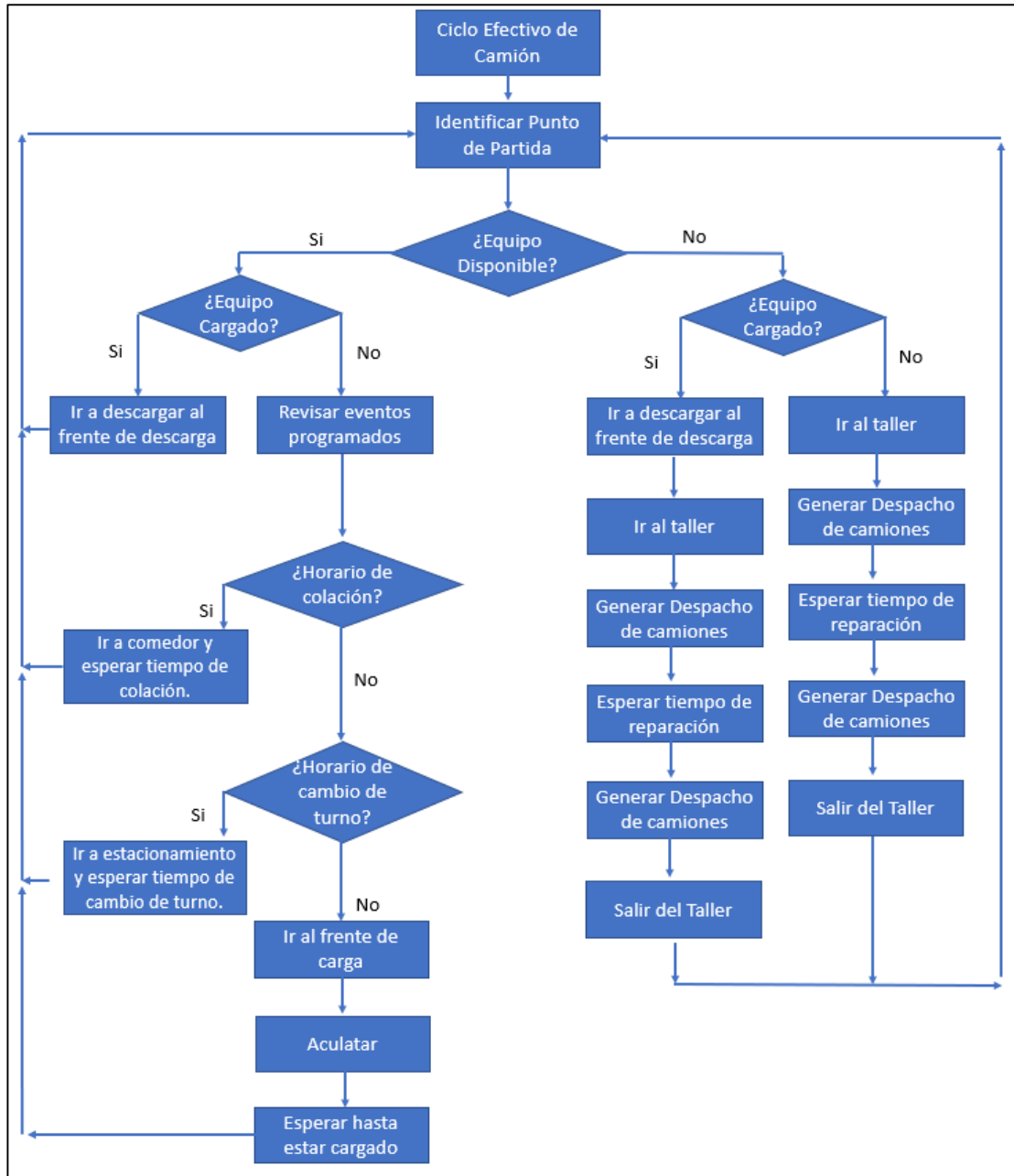


Figura 5-2: Lógica de simulación del camión.

La lógica de simulación del camión supone inicialmente que tiene una asignación, por lo que ésta inicialmente debe ser entregada a través de un *input*. Dependiendo del tipo de despacho analizado esta asignación será calculada a través de un problema de optimización o simplemente por una regla de saturación, como se explica en las secciones siguientes. Por otro lado, la lógica de simulación de los equipos de carguío se puede observar en la Figura 5-3.

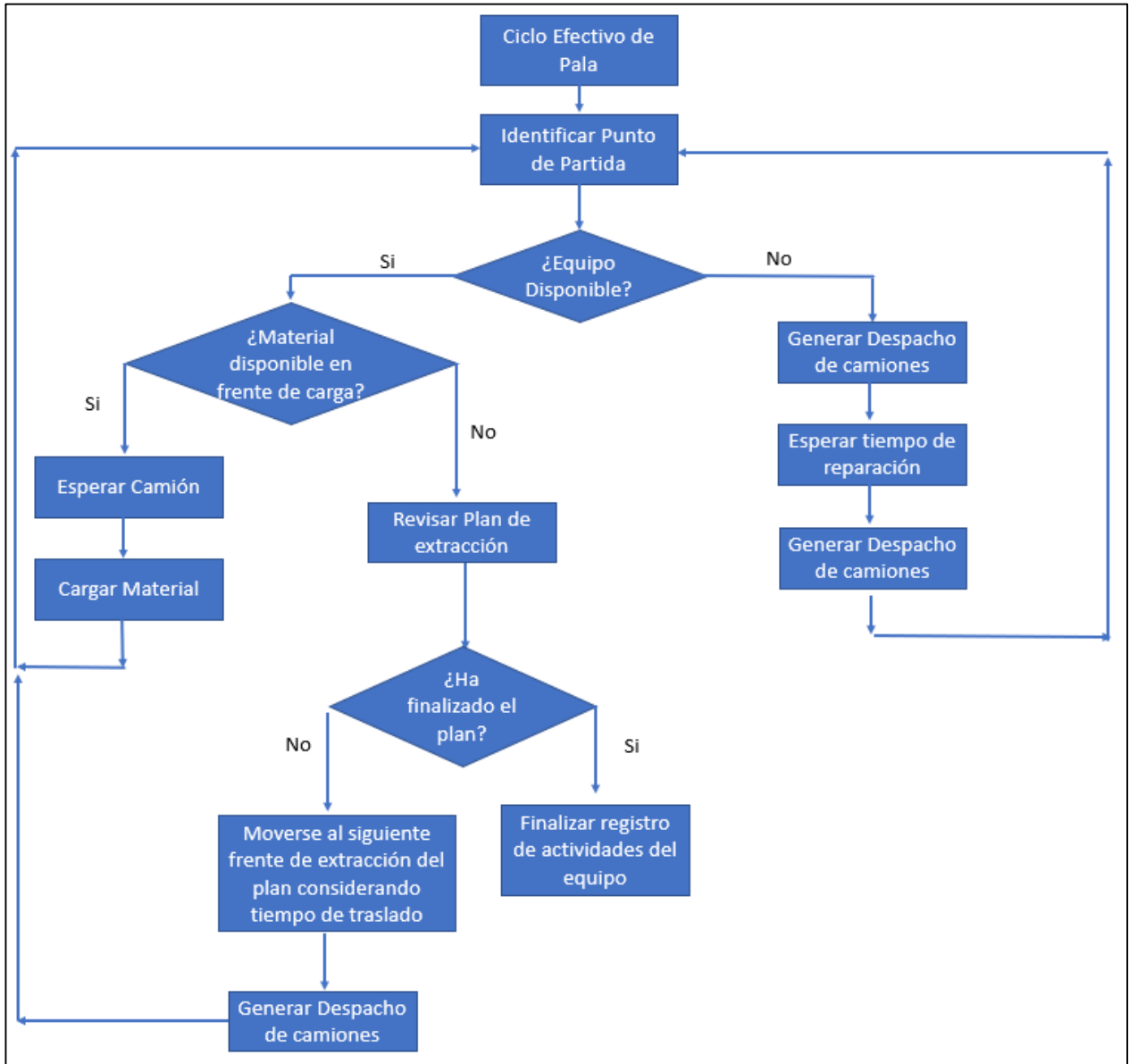


Figura 5-3: Lógica de simulación de los equipos de carguío.

Tal como se puede apreciar en las dos figuras anteriores, existen determinadas situaciones en donde los equipos deben generar un despacho de camiones, por lo que es en este tipo de instancias en donde se genera el vínculo entra la simulación y la optimización.

5.5. Modelo integrado de simulación y optimización

Al iniciar la simulación se resuelve el problema de optimización del despacho, con lo cual todos los camiones presentes en la simulación saben hacia dónde dirigirse y en qué circuito van a estar trabajando. Durante la simulación pueden ocurrir los siguientes eventos:

- Falla/Reparación de equipos de carguío.
- Falla/Reparación de camiones.
- Cumplimiento del plan en una frente de carga.

Ante cada uno de estos eventos, se resuelve nuevamente el problema de optimización, considerando las condiciones actuales de la operación, lo cual genera un nuevo despacho. La simulación se mantiene con este despacho hasta que otro evento ocurra, momento en que se repite nuevamente este ciclo. Se debe señalar que en términos de *software* se trabaja directamente en código *Python*, donde se realizan las simulaciones en DSIM Core. Se utiliza *Gurobi* para resolver el problema de optimización del despacho y la solución pasa como *input* directo a la simulación en tiempo real.

Finalmente se debe mencionar que el problema de optimización con el que se trabaja en esta tesis intenta maximizar la productividad de la flota, sin embargo, puede que existan estrategias de despacho que busquen otros objetivos y en este sentido la metodología no se ve afectada debido a que el despacho pasa a ser totalmente modular.

5.6. Variación del layout en el tiempo

La minería a cielo abierto debido a su tipo de extracción se caracteriza por ir profundizando sus frentes de extracción a medida que transcurre la vida de la mina, lo cual implica directamente que existe una variación de los frentes de carga en el tiempo. Existen varios efectos al realizar esta profundización, pero el más importante para los análisis de esta tesis corresponde a las bajas productivas.

Uno de los objetivos principales de este trabajo corresponde a determinar la productividad máxima que puede tener una operación en el mediano plazo, por lo que se debe considerar la variación del *layout* dentro de la simulación.

La manera en que se incorpora la variación del layout corresponde a un caso semi-estático, en donde se ve la variación mensual de la posición de los equipos de carguío (1 posición por mes), y se ve el cumplimiento del plan en esa frente. A modo de ejemplo, se puede observar las posiciones para dos meses de un equipo de carguío en la Figura 5-4.

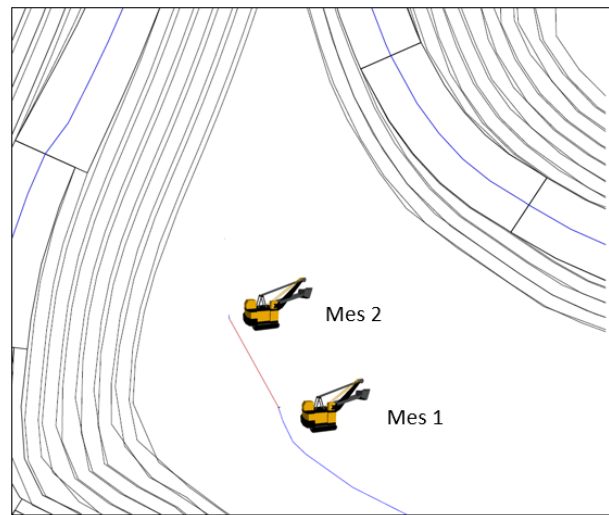


Figura 5-4: Posicionamiento de equipos en el primer periodo.

Como se considera el plan para la variación del *layout*, es necesario que estén disponibles en la simulación (como objetos) los frentes de carga, tanto en el mes que se analiza como en el mes siguiente para el caso inicial (debido a que se puede adelantar respecto al plan). Por otro lado, desde el segundo periodo en adelante hay que considerar además el periodo anterior en la simulación, debido a eventuales retrasos que tuvo la operación en los periodos pasados.

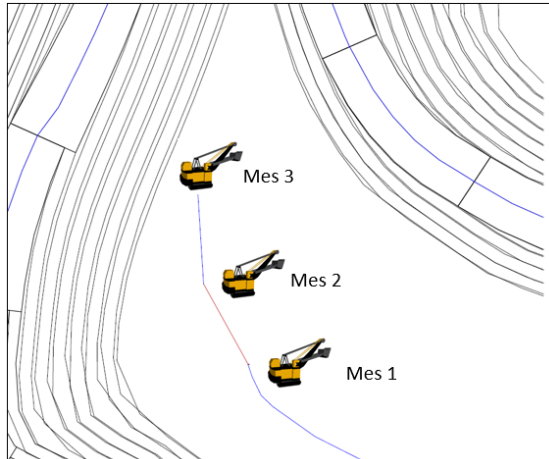


Figura 5-5: Posicionamiento de equipos en el segundo periodo.

Finalmente, se debe señalar que las simulaciones se realizan en un computador que posee un procesador Intel Core i7-4790 3.60 GHz con 16.0 GB de RAM utilizando 5 núcleos para todos los casos de estudio realizados.

6 EJERCICIO DE SIMULACIÓN SINTÉTICO

En el presente capítulo se describen las características principales de un ejercicio de simulación a corto y mediano plazo realizado en un *layout* sintético, donde se presenta la configuración física de la operación y sus componentes. Además, se detallan los *inputs* utilizados y siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3, se muestran los resultados obtenidos.

El objetivo principal de este ejercicio consiste en determinar el comportamiento de los distintos tipos de despacho en un caso controlado, donde se tiene pocas variables, de manera de poder establecer comparaciones entre los mismos a modo de determinar cuál de ellos posee mejores rendimientos e índices operacionales, tanto en corto como mediano plazo.

6.1. Ejercicio de simulación a corto plazo

6.1.1 Descripción del caso

El caso de simulación a corto plazo busca estimar la productividad máxima de la operación y comparar los resultados de las diferentes estrategias de despacho. En este caso se considera la utilización de 3 frentes de carga y 3 frentes de descarga (chancador, botadero y *stock*), además de contar con un estacionamiento para realizar los cambios de turno, un comedor para colaciones y un taller para reparar los camiones. La configuración espacial de cada una de las componentes se puede observar en la Figura 6-1.

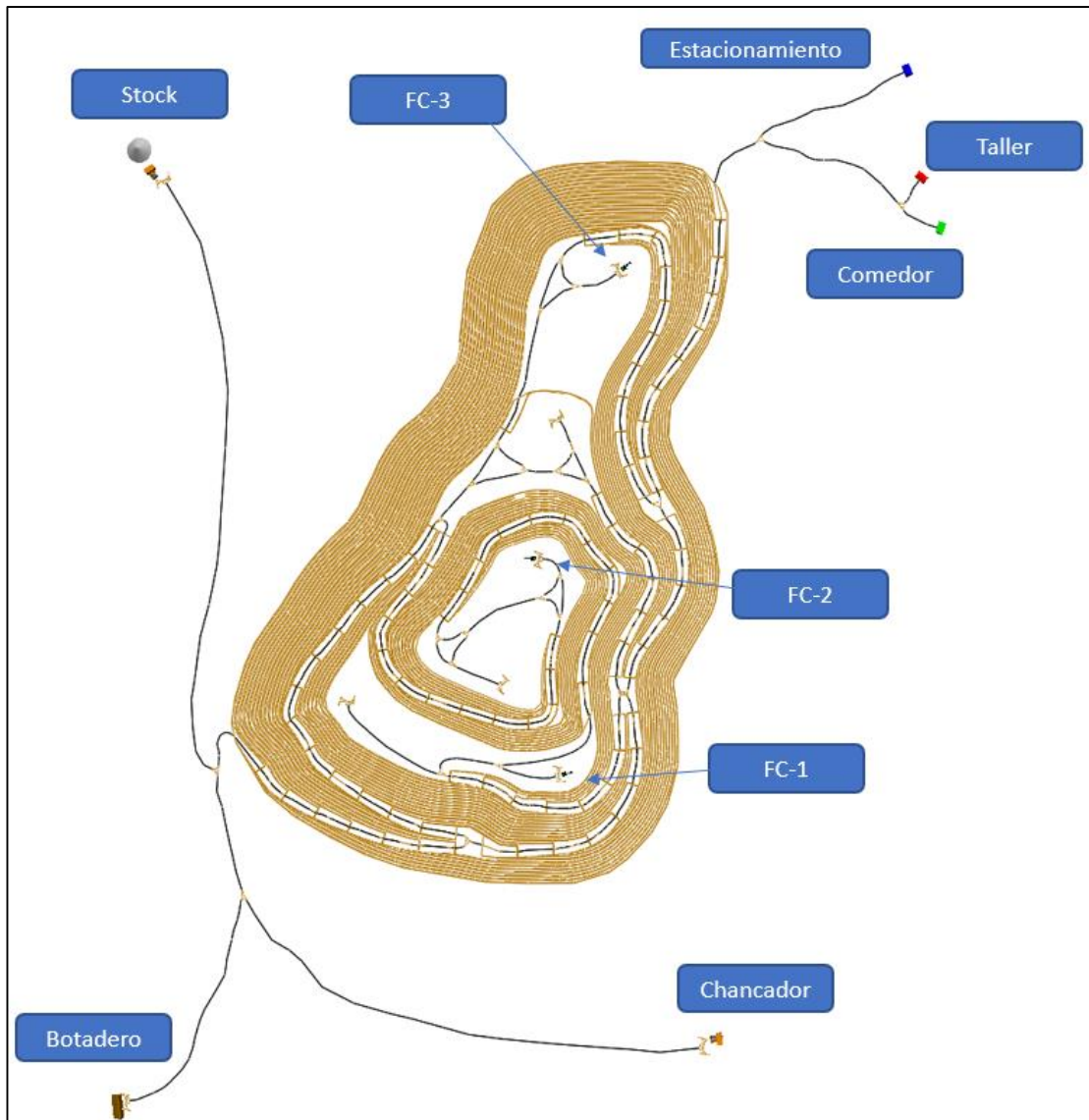


Figura 6-1: Vista en planta del layout simulación.

Para efectos de este ejercicio se considera arbitrariamente que la asignación de material desde el frente de carga hasta el frente de descarga es la siguiente:

- FC-1: Chancador.
- FC-2: Botadero.
- FC-3: Stock.

Se considera además que cada frente de carga posee infinito material para cargar y que los equipos de carguío se mantendrán en esa frente durante toda la simulación, la cual como se trata del corto plazo corresponde a 24 [h]. Las distancias entre los frentes de carga y descarga se pueden observar en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Distancia entre frentes de carga y descarga. Ejercicio a corto plazo.

Frente de carga	Frente de descarga	Distancia [km]
FC-1	Chancador	4.60
FC-2	Botadero	4.86
FC-3	Stock	4.94

En términos de eventos de simulación, tanto los equipos de carguío como los de transporte pueden tener fallas mecánicas, las cuales se distribuyen de forma aleatoria según una distribución de probabilidad que está dada por los *inputs*. Por otro lado, se consideran demoras programadas como cambios de turno y colaciones, cuyo inicio y duración se pueden observar en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Demoras programadas consideradas

Eventos	Hora de inicio [h]	Duración [h]
Cambio de turno 1	10.0	0.5
Colación 1	6.0	1.0
Cambio de turno 2	22.0	0.5
Colación 2	18.0	1.0

6.1.2 Input de simulación

La mayoría de los inputs utilizados en este ejercicio se obtienen desde la publicación de Mena et al. (2013), donde están las distribuciones de los tiempos entre falla y reparación tanto de palas como de camiones. Algunos valores como tiempos de acuatamiento, tiempos de carga y descarga han sido obtenidos a partir de valores promedios de simulaciones que se han realizado con DSIM Open Pit en diversos proyectos.

Los parámetros utilizados para la flota de camiones y para los equipos de carguío se pueden observar en la Tabla 6-3 y Tabla 6-4 respectivamente.

Tabla 6-3: Inputs generales de flota de camiones

Parámetros	Valor
Velocidad cargado [km/h]	25.0
Velocidad descargado [km/h]	30.0
Tiempo aculatamiento en frente de carga [s]	30.0
Tiempo aculatamiento en frente de descarga [s]	30.0
Disponibilidad promedio [%]	83.9 %

Tabla 6-4: Inputs generales equipos de carguío

Parámetros	Valor
Carga promedio [t]	330.0
Tiempo de carga [s]	150.0
Disponibilidad [%]	87.5%

Se debe utilizar la disponibilidad de los equipos debido a que corresponde a uno de los parámetros del problema de optimización. De manera directa esto implica que se debe tener registros de las fallas de los equipos para poder considerar el efecto de disponibilidad en la asignación. Las distribuciones de los tiempos medios entre fallas y tiempos medios de reparación, para cada uno de los equipos de carguío y transporte, se puede observar en la sección 10.1 de los Anexos.

Por otro lado, el problema de optimización considera un *budget* en cada destino, por lo que se debe considerar esto como un *input* del problema. Las producciones esperadas para los frentes de descarga que se consideran para este escenario se pueden observar en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Producción esperada en frente de descarga.

Frente de descarga	Producción diaria [kt]
Botadero	90.0
Chancador	110.0
Stock	100.0

Finalmente se debe mencionar que la posición inicial de los camiones en la simulación es aleatoria entre el comedor, el estacionamiento y el taller, y que se consideran 100 réplicas para determinar los resultados.

6.1.3 Resultados y análisis

6.1.3.1 Análisis de horizonte de evaluación

Inicialmente se analiza el rendimiento que tiene el despacho de optimización continua en función del horizonte de evaluación productivo, debido a que este despacho considera las posiciones relativas de los equipos en el *layout* a la hora de resolver el problema de optimización, en donde se calcula cuál es la combinación más productiva en este horizonte. El resultado de la producción total diaria en función del horizonte de evaluación se puede observar en la Figura 6-2.

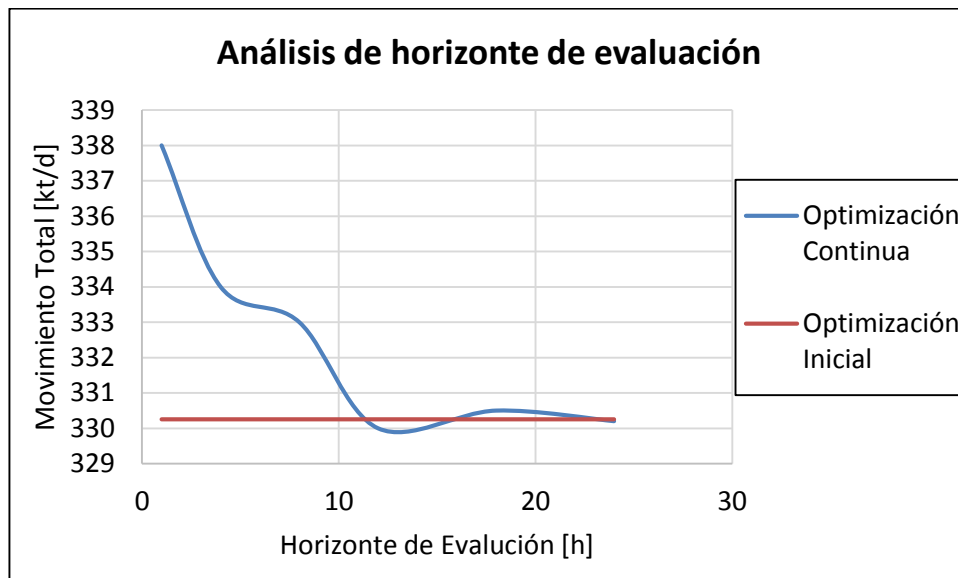


Figura 6-2: Productividad en función del horizonte de evaluación. (30 Camiones)

De la Figura 6-2 se observa que a medida que el horizonte de evaluación aumenta, el modelo comienza a realizar asignaciones que tienden a la solución inicial que considera la operación en un estado estacionario a largo plazo, donde la posición actual del equipo no corresponde a un factor importante. Se entiende que a medida que el horizonte de evaluación es más pequeño, el modelo es más propenso a mantener la asignación que tienen los camiones en el instante en que se resuelve

el problema, y esta asignación debería cambiar sólo en un escenario más conveniente (por ejemplo, cambiar su asignación a un circuito que tiene menor tiempo de ciclo). Desde aquí en adelante se considera un horizonte de evaluación igual a 1 hora debido a que se obtiene un máximo productivo.

6.1.3.2 Simulación de las diferentes estrategias de despacho

Inicialmente se realiza un análisis de saturación de la flota, el cual consiste en determinar la productividad del sistema al ir agregando camiones a la simulación. El resultado de esto se puede observar en la Figura 6-3.

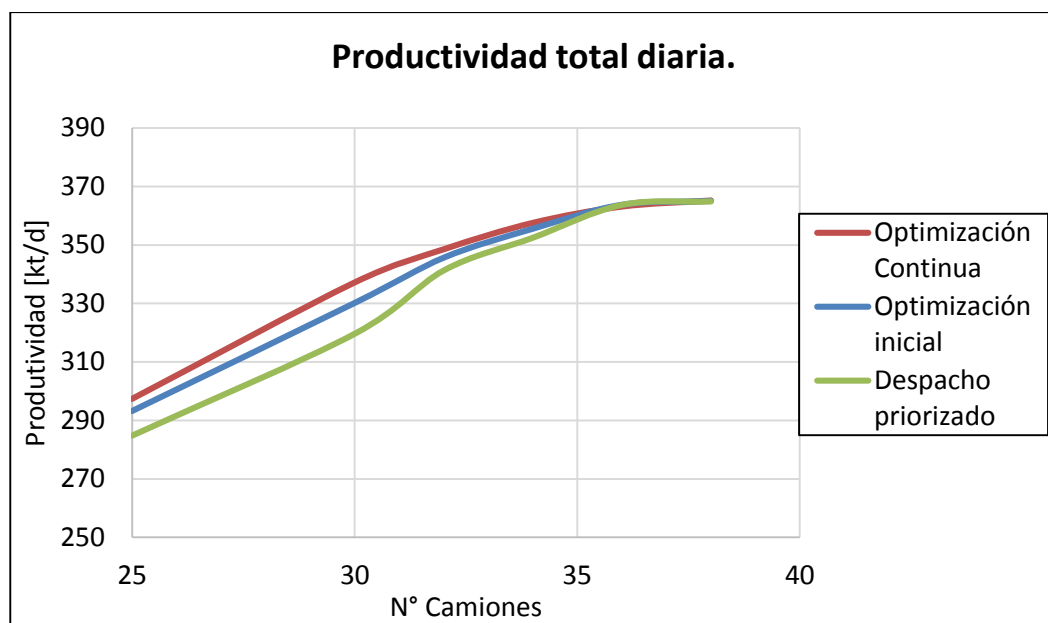


Figura 6-3: Movimiento total en función del número de camiones.

Se puede observar que el despacho que utiliza la optimización continua siempre tiene un rendimiento mayor al del despacho priorizado y al de la optimización inicial, exceptuando en la última parte en donde se alcanza la saturación del sistema y todos los despachos obtienen el rendimiento máximo (366 [kt/d] para esta configuración). En este caso, el rendimiento máximo considera tener entre 12 a 13 camiones asignados por circuito, lo cual es un resultado netamente teórico ya que las operaciones mineras a cielo abierto utilizan aproximadamente entre 7 a 10 camiones por pala (esto se ha podido observar en los proyectos de simulación realizados por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos en minas como Gabriela Mistral, Radomiro Tomic,

Andina y Escondida), debido a que la ganancia productiva no compensa el costo operativo de una flota numerosa (Alarie & Gamache, 2002).

El aumento porcentual de productividad en el escenario de una asignación de 10 camiones respecto al despacho priorizado se puede observar en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6: Aumento productivo respecto a despacho priorizado (10 camiones por pala).

Tipo de despacho	Aumento productivo [%]
Optimización continua	6.0%
Optimización inicial	3.4%

De lo anterior se puede observar que, para este ejercicio, el hecho de considerar un problema de optimización para el despacho de camiones genera un aumento productivo de un 3.4%, y si este problema se ejecuta con una frecuencia determinada en la simulación, el aumento productivo puede ser cercano a un 6%.

Por otro lado, la distribución del tonelaje extraído y llevado a los distintos frentes de carga para las distintas estrategias de despacho se puede observar en las Figura 6-4, Figura 6-5 y Figura 6-6.

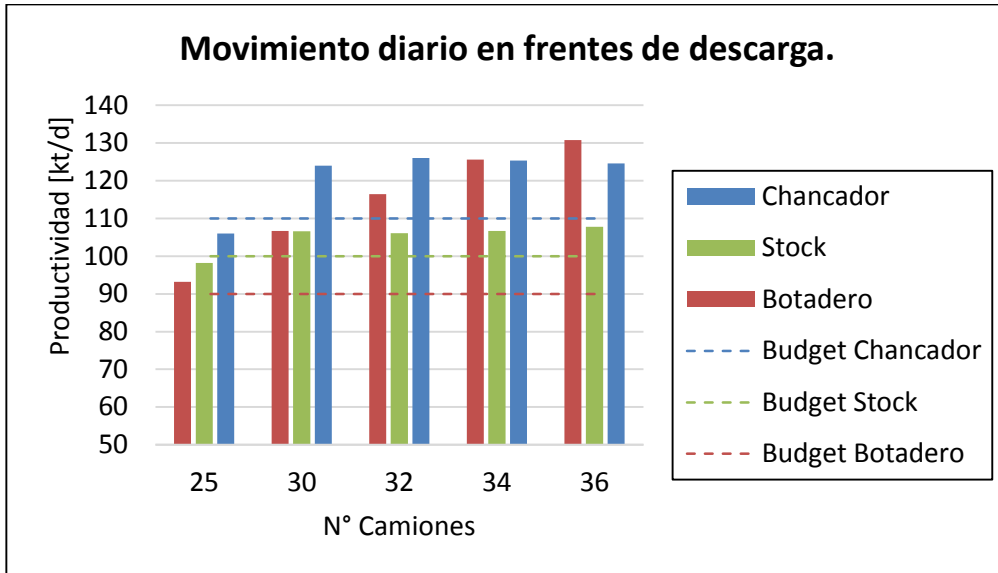


Figura 6-4: Productividad según destino considerando optimización continua.

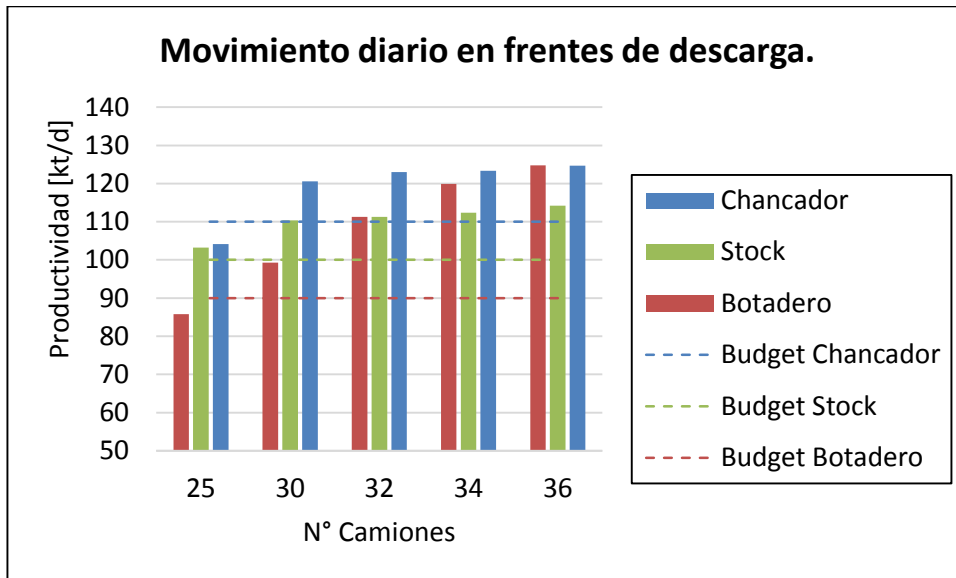


Figura 6-5: Productividad según destino considerando optimización inicial.

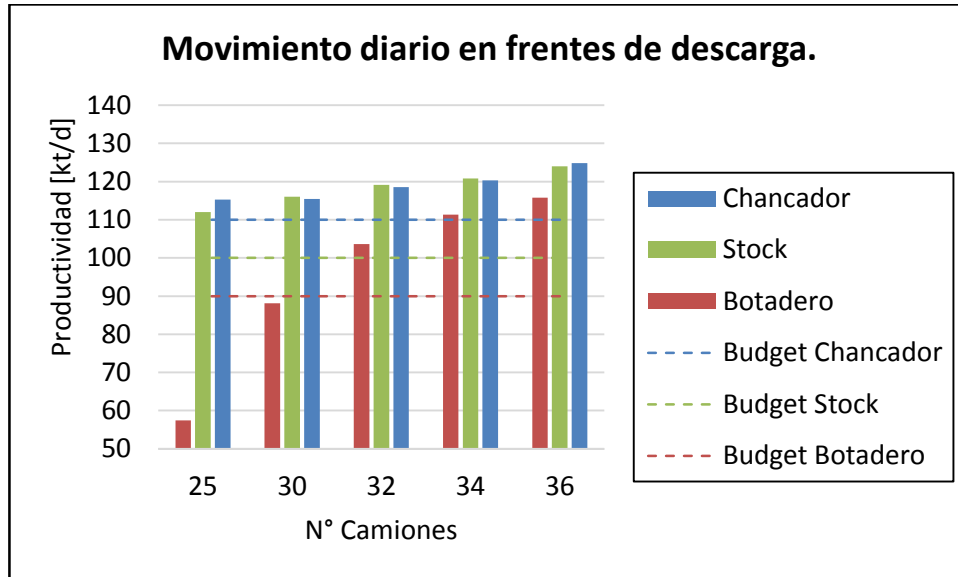


Figura 6-6: Productividad según destino considerando despacho priorizado.

De las figuras anteriores se puede observar que tanto la estrategia de despacho de optimización continua, como la estrategia de optimización inicial modifican sus asignaciones de camiones en los distintos destinos, de manera de poder cumplir con el *target* solicitado (110 [kt/d] en chancador, 100[kt/d] en stock y 90[kt/d] en botadero), mientras que el despacho priorizado sólo se preocupa de saturar las palas siguiendo un orden determinado, que en este caso corresponde a saturar las palas cuyo destino es el chancador y el stock.

Desde la simulación se obtienen los tiempos efectivos, las pérdidas operacionales, las demoras programadas, el tiempo en reserva y el tiempo no disponible tanto de la flota de camiones como de los equipos de carguío. La distribución de los tiempos de simulación para la flota de camiones, considerando 30 equipos para las 3 estrategias de despacho, se puede observar en la Figura 6-7.

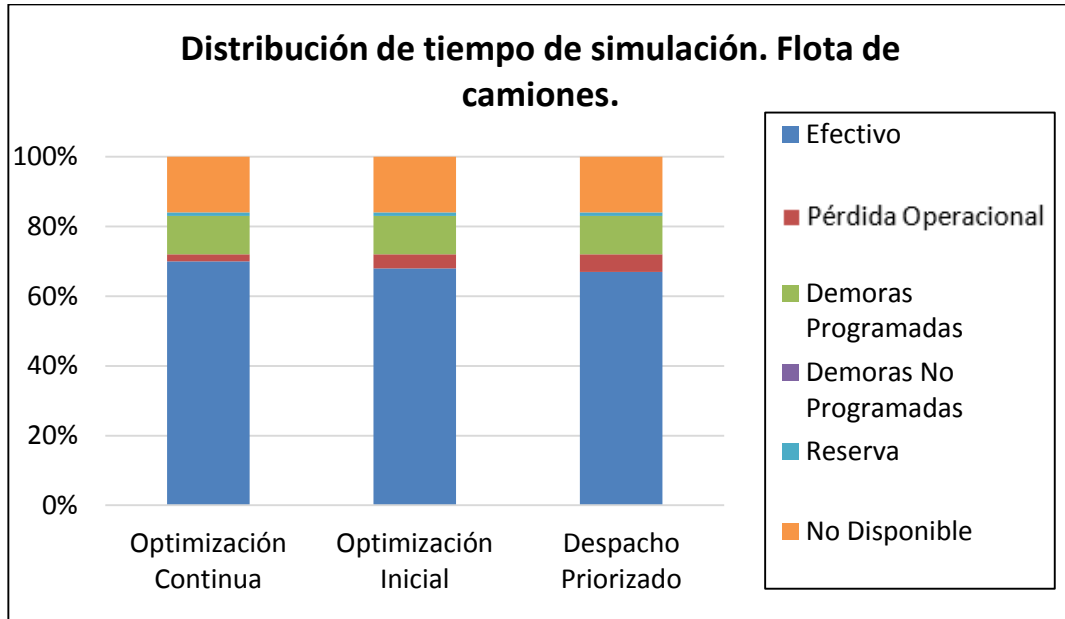


Figura 6-7: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. (30 camiones).

Desde la Figura 6-7, se observa que el tiempo efectivo de los camiones encuentra su mayor valor cuando se considera la estrategia de despacho de optimización continua (70%), mientras que su menor valor ocurre cuando se considera el despacho priorizado (67%). Además, se puede observar que el tiempo no disponible es constante en las tres estrategias de despacho, por lo que teniendo la misma disponibilidad el equipo tiene una mayor utilización en la estrategia de optimización continua. Los resultados para las distintas configuraciones de camiones se encuentran en la sección 10.2.1 de los Anexos.

Por otro lado, se grafican de igual manera los tiempos de simulación para los equipos de carguío, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 6-8.

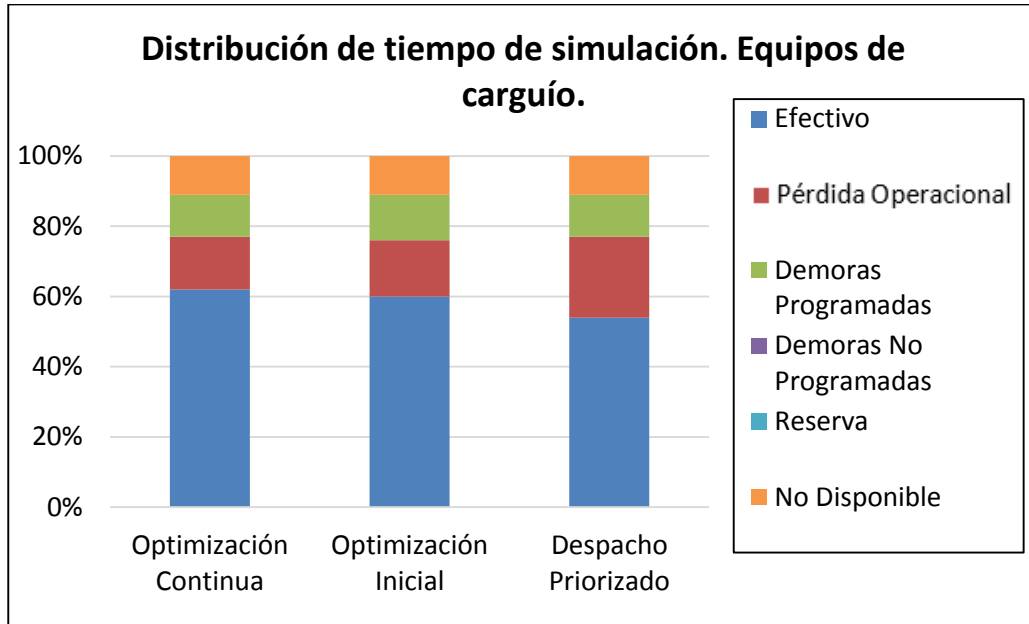


Figura 6-8: Distribución de tiempos de simulación Equipos de carguío. (30 camiones)

La tendencia observada es idéntica a la de los camiones, en el sentido de que se tienen mejores resultados para las estrategias de despacho que consideran el problema de optimización, lo cual se debe a una mejor asignación de los recursos. Los resultados considerando diferentes números de camiones en la simulación se pueden observar en la sección 10.2.1 de los Anexos.

Al obtener los tiempos de simulación, se pueden calcular índices operativos como utilización y disponibilidad, tanto de la flota de camiones como de los equipos de carguío. La utilización (en base disponible) de los equipos se puede observar en la Figura 6-9 y Figura 6-10.

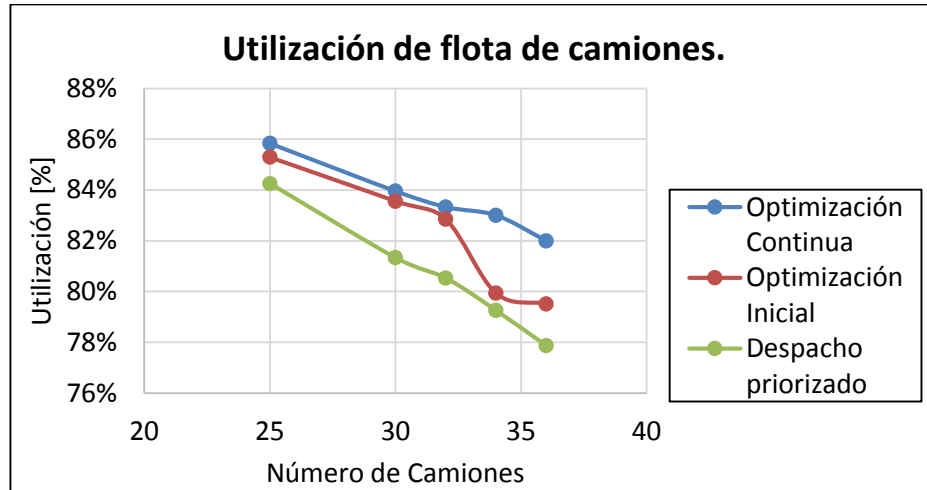


Figura 6-9: Utilización de flota de camiones en función del número de camiones.

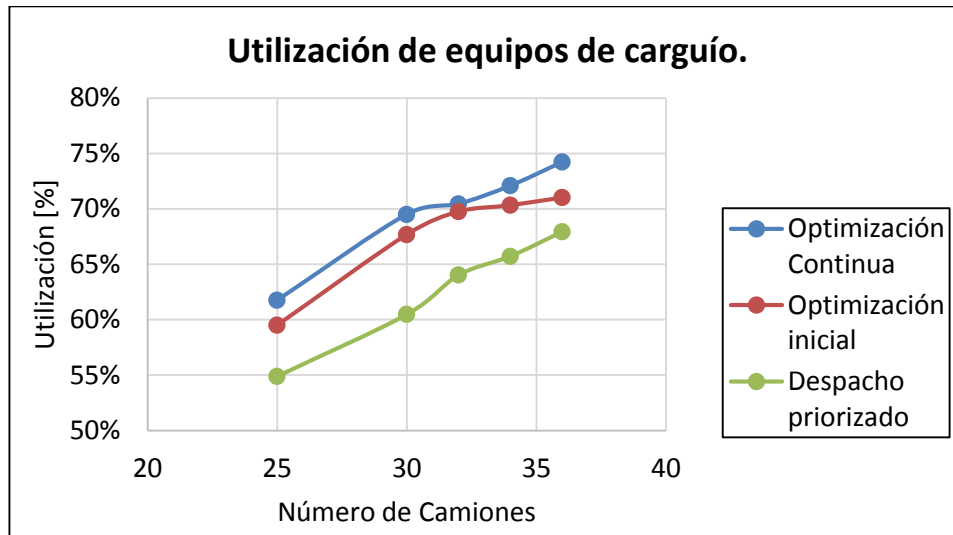


Figura 6-10: Utilización de equipos de carguío en función del número de camiones.

Desde las figuras anteriores se puede observar claramente que la utilización en base disponible de los equipos es considerablemente mejor por el hecho de tomar mejores decisiones en la asignación del circuito de los equipos.

Por otro lado, se puede observar que a medida que el número de camiones aumenta, la utilización de la flota de camiones disminuye, mientras que la utilización de los equipos de carguío aumenta. Lo anterior se debe a que, al haber menos camiones, existe menos congestión en las rutas y menos colas en los frentes de carga, por lo que los camiones tienen menores pérdidas

operacionales, lo que hace que sean más efectivos, mientras que las palas aumentan su tiempo de espera por camiones debido a la falta de camiones, lo que hace que tengan una menor utilización.

6.1.3.3 Análisis de asignación

El problema de optimización del despacho de camiones considera la disponibilidad de los equipos como un *input* con el objetivo de poder integrar el historial de fallas del camión, a modo de poder tomar las mejores decisiones a la hora de despachar. Desde las simulaciones realizadas se analiza la asignación inicial (la cual es equivalente tanto en la optimización inicial como en la continua) de cada camión a los frentes de descarga y se grafica la disponibilidad promedio de los camiones asignados a un destino, lo cual se puede observar en la Figura 6-11.

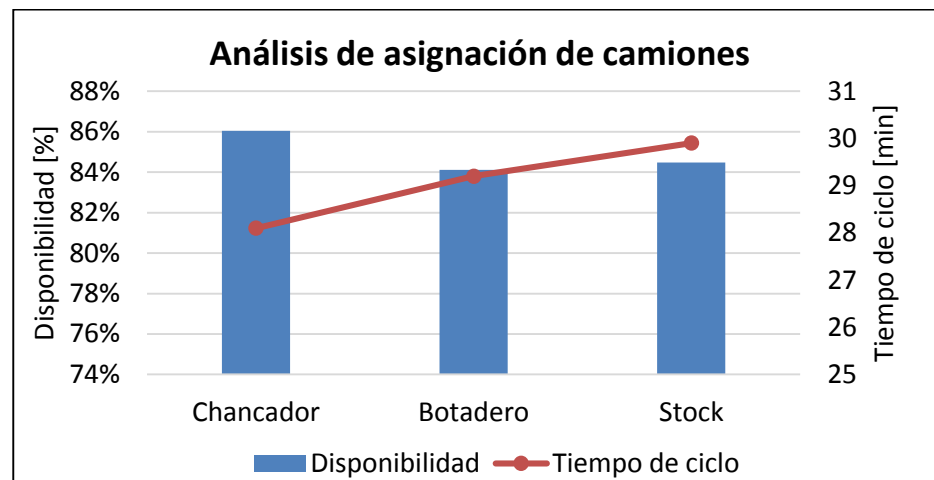


Figura 6-11: Análisis de asignación de camiones. Optimización inicial y continua.

De la Figura 6-11 se puede observar que la disponibilidad promedio de los camiones asignados es creciente respecto al *target* del circuito (110 [kt/d] en chancador, 100[kt/d] en stock y 90[kt/d] en botadero). Por otro lado, como el objetivo del problema de optimización es maximizar la productividad, se podría pensar que las disponibilidades mayores son asignadas a los circuitos con menor tiempo de ciclo, pero en este caso se puede observar que, si bien esto ocurre con el chancador, a la hora de decidir la asignación entre el stock y el botadero, el problema de optimización asigna camiones con mayor disponibilidad al *stock* debido a que tiene un *target* de mayor de productividad, por lo que de esta manera se busca cumplir con la meta productiva del *stock* antes que ser más productivo en el botadero.

6.2. Ejercicio de simulación a mediano plazo

6.2.1 Descripción del caso

El caso de simulación a mediano plazo busca estimar la pérdida productiva en la operación en el tiempo, la cual se debe al aumento de las distancias entre los frentes de carga y descarga dado por el desarrollo de la operación. Al igual que el ejercicio de corto plazo, se consideran 3 frentes de carga y 3 frentes de descarga (chancador, botadero y *stock*), además de contar con un estacionamiento para realizar los cambios de turno, un comedor para colaciones y un taller para reparar los camiones.

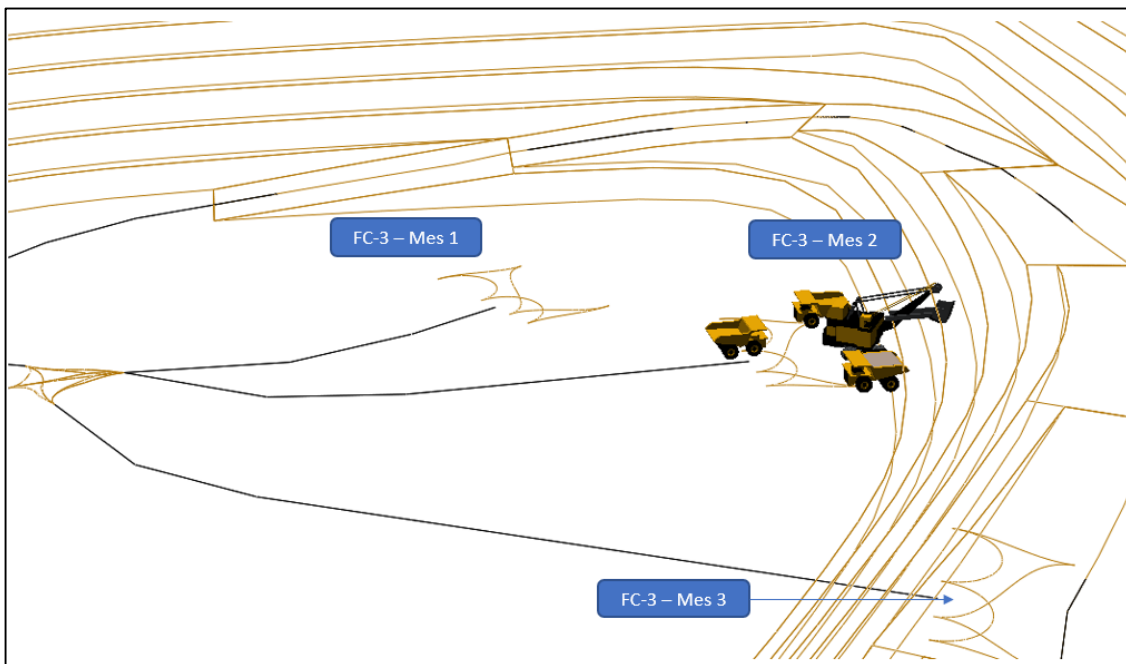


Figura 6-12: Variación del layout en el tiempo

La Figura 6-12 muestra esquemáticamente cómo se modela la evolución del layout en el tiempo. En este caso se considera un avance mensual de 60 metros lineales de la posición de la pala respecto a su posición pasada, por lo que al cabo de 6 meses (tiempo de evaluación del ejercicio) los 3 frentes de carga se encontrarán 300 [m] más alejados de sus respectivos destinos. Finalmente se debe considerar las posiciones tanto del mes anterior como del mes siguiente del que se está simulando, debido a que la pala se puede adelantar o atrasar.

6.2.2 Input de simulación

Los *inputs* utilizados en este ejercicio corresponden principalmente a los utilizados en el ejercicio de corto plazo, por lo que las distribuciones de falla de los equipos se pueden observar en la sección 10.1.1 del capítulo de Anexos. En términos de cantidad de equipos, se utilizan 3 equipos de carguío y 34 camiones. Además, al igual que el caso anterior, se consideran 100 réplicas para obtener los resultados.

Un factor que cambia durante los meses de análisis corresponde a las distancias entre los equipos de carguío y las frentes de descarga, las cuales cambian mes a mes. En la Tabla 6-7 se puede observar este aumento de distancia dentro del tiempo de análisis y su aumento porcentual.

Tabla 6-7: Distancia entre frentes de carga y descarga. Ejercicio mediano plazo.

Frente de carga	Frente de descarga	Distancia mes 1 [km]	Distancia mes 6 [km]	Aumento porcentual [%]
FC-1	Chancador	4.60	4.90	6.5%
FC-2	Botadero	4.86	5.16	6.2%
FC-3	Stock	4.94	5.24	6.1%
	Chancador	4.94	5.23	6.1%

Otro de los *inputs* que varía respecto al ejercicio de corto plazo corresponde al plan entregado. En el caso del corto plazo se consideraba que el frente de carga tenía infinito material en el frente, por lo que la pala no debía reposicionarse para seguir extrayendo material. Sin embargo, como en este caso se requiere evaluar el atraso de las palas en los diferentes frentes de carga, se debe contar con un plan, el cual se puede observar en la Tabla 6-8.

Tabla 6-8: Requerimiento diario

Frente de carga	Destino	Movimiento total mensual [Mt]	Productividad requerida [kt/d]	Productividad real requerida [kt/d]
FC-1	Chancador	3.3	110	114
FC-2	Botadero	3.3	110	114
FC-3	Stock	1.8	55	57
	Chancador	1.8	55	57

Se considera para este ejercicio que el equipo tiene 1 día de pérdida operativa producto de traslados, por lo que el movimiento total mensual debe extraerse en 29 días según esto se calcula la productividad real. Se debe señalar que, para efectos de este ejercicio, el requerimiento de tonelaje en los frentes de descarga permanece constante durante los 6 meses, por lo que el tonelaje mínimo diario a extraer corresponde a 342 [kt]. Finalmente, se debe señalar que en este caso se considera que el frente de carga (FC-3) extrae mineral y que el 50 % de la extracción del frente se debe transportar al *stock*.

6.2.3 Resultados y análisis

Inicialmente se realizan las simulaciones de los 6 meses analizados y se obtiene el rendimiento diario que tiene cada mes, el cual se puede observar en la Figura 6-13.

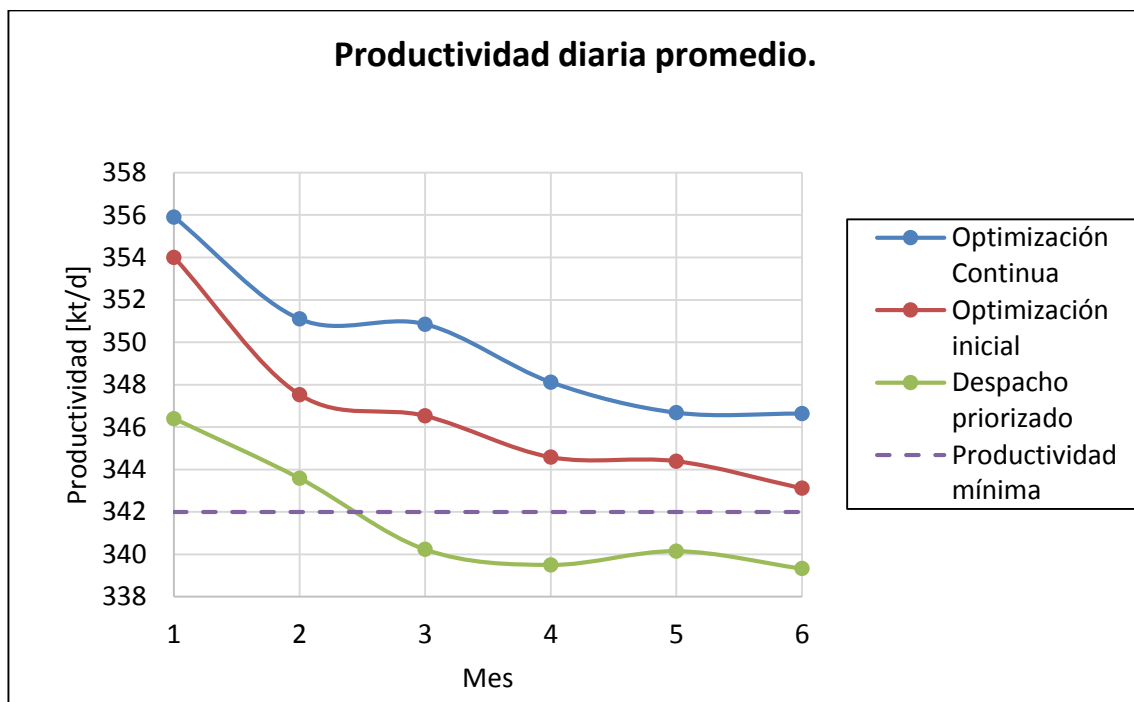


Figura 6-13: Productividad diaria promedio en el mediano plazo.

En la Figura 6-13. se puede ver que existe una tendencia a disminuir la productividad, lo cual se debe a que el tiempo de ciclo va aumentando producto de la evolución de la mina en el tiempo. Por otro lado, se puede observar que la estrategia de despacho priorizado desde el tercer mes no es capaz de cumplir con la cuota necesaria para extraer el material, lo que implica de manera

directa que, si no se adelanta suficiente material los dos primeros periodos, esta estrategia no podrá ser capaz de cumplir el plan. Finalmente se puede observar que las estrategias que consideran el problema de optimización son capaces de cumplir en todos los periodos analizados, por lo que solo generarán adelantamiento de material.

Tal como se mencionó anteriormente, existe una tendencia de reducción de productividad en el tiempo debido al aumento de los tiempos de ciclo. Esta reducción productiva se da entre el primer y último periodo analizado y se puede observar en la Tabla 6-9.

Tabla 6-9: Reducción de productividad según tipo de despacho.

Tipo de despacho	Reducción productiva [%]
Optimización continua	2.6%
Optimización inicial	3.1%
Despacho priorizado	2.0%

El tiempo de ciclo tiende a aumentar producto de que las distancias en el *layout* son cada vez mayores. Lo anterior se puede observar en la Figura 6-14, en donde se puede observar que para todos los circuitos existe un aumento cercano a los 2 minutos entre el primer y el último periodo.

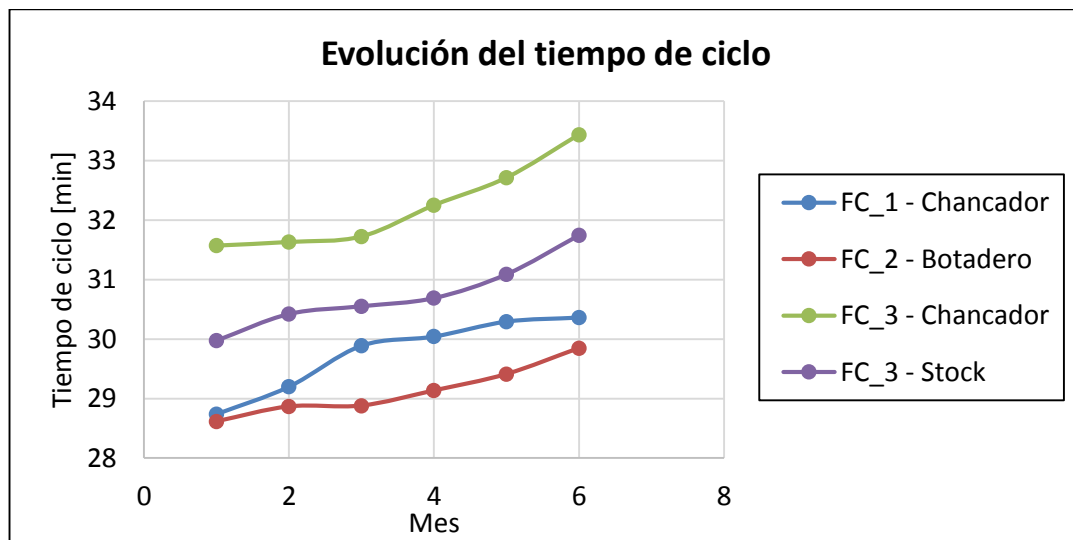


Figura 6-14: Evolución del tiempo de ciclo en el mediano plazo

Además de la productividad, desde la simulación se puede extraer la producción obtenida durante el periodo de análisis. El movimiento total para los distintos tipos de despacho y cumplimiento del plan se puede observar en la Tabla 6-10.

Tabla 6-10: Cumplimiento del plan en el mediano plazo

Tipo de despacho	Objetivo [Mt]	Extracción total [Mt]	Cumplimiento [%]
Optimización continua	59.4	60.9	102.5%
Optimización inicial	59.4	60.3	101.6%
Despacho priorizado	59.4	59.4	100.0%

De la Tabla 6-10 se puede observar que los 3 tipos de despacho son capaces de cumplir el plan, por lo que éste se puede considerar factible. Por otro lado, se sabe por la Figura 6-13 que desde el tercer periodo la estrategia de despacho priorizado no es capaz de cumplir con el movimiento mínimo, por lo que su cumplimiento se debe a lo que fue capaz de adelantar los primeros dos periodos. La producción mensual para las distintas estrategias de despacho en el chancador se puede observar en las Figura 6-15, Figura 6-16 y Figura 6-17, mientras que la producción para el resto de los destinos se puede observar en la sección 10.2.2 de los Anexos.

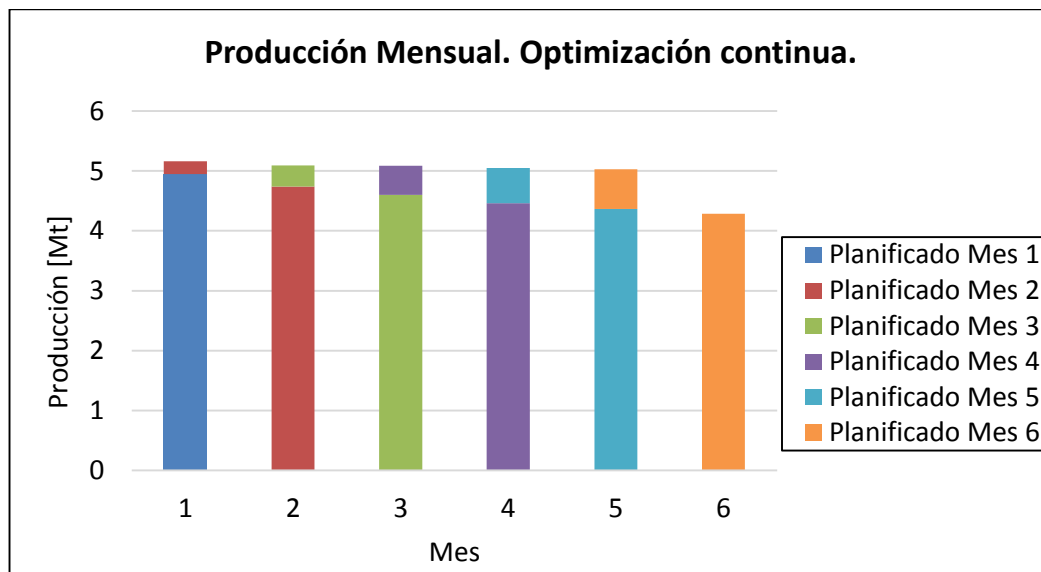


Figura 6-15: Producción mensual en chancador. Optimización continua.

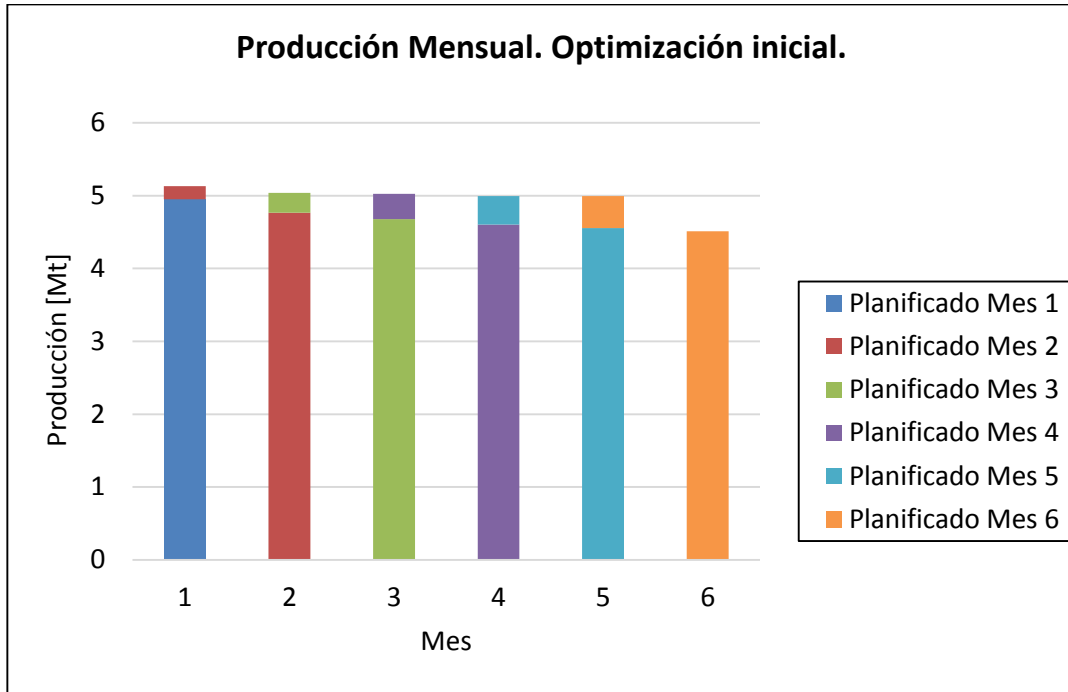


Figura 6-16: Producción mensual en chancador. Optimización inicial.

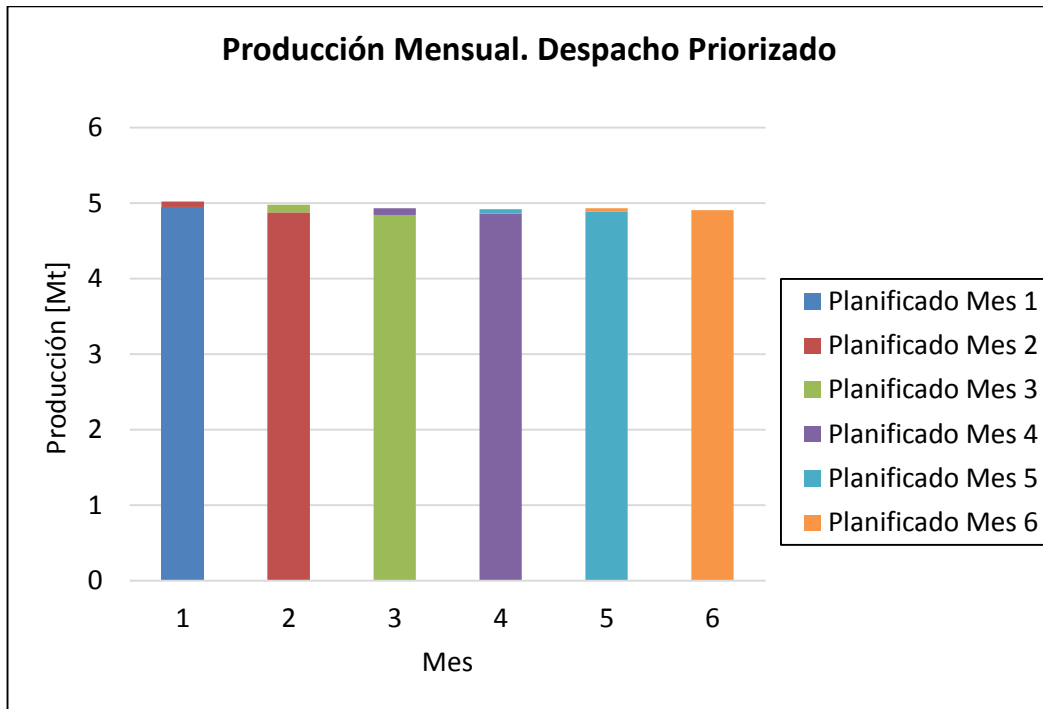


Figura 6-17: Producción mensual en chancador. Despacho priorizado.

De las figuras anteriores se puede apreciar que las 3 estrategias son capaces de cumplir el movimiento total planificado para los 6 meses. Sin embargo, la estrategia de despacho priorizado alcanza a llegar a este valor en una situación límite, en la cual sólo cumple debido a que es capaz de adelantar material en los primeros 2 periodos, por lo que, si el análisis se extendiese un par de periodos, este tipo de despacho no debería poder cumplir.

Por otro lado, al calcular los índices operacionales de las estrategias de despacho en los diferentes periodos, se puede notar una tendencia a mayor utilización de la flota de camiones y a una menor utilización de los equipos de carguío a medida que avanza el tiempo. Esto se puede observar en la Figura 6-18 y Figura 6-19.

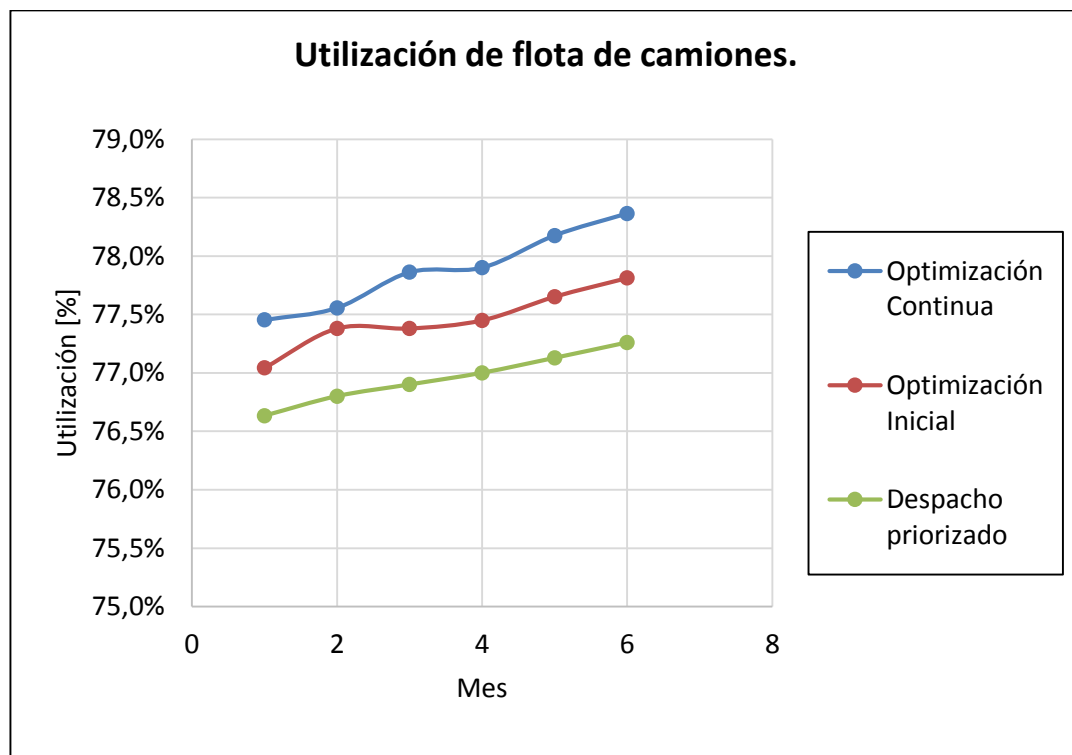


Figura 6-18: Utilización de flota de camiones en el mediano plazo.

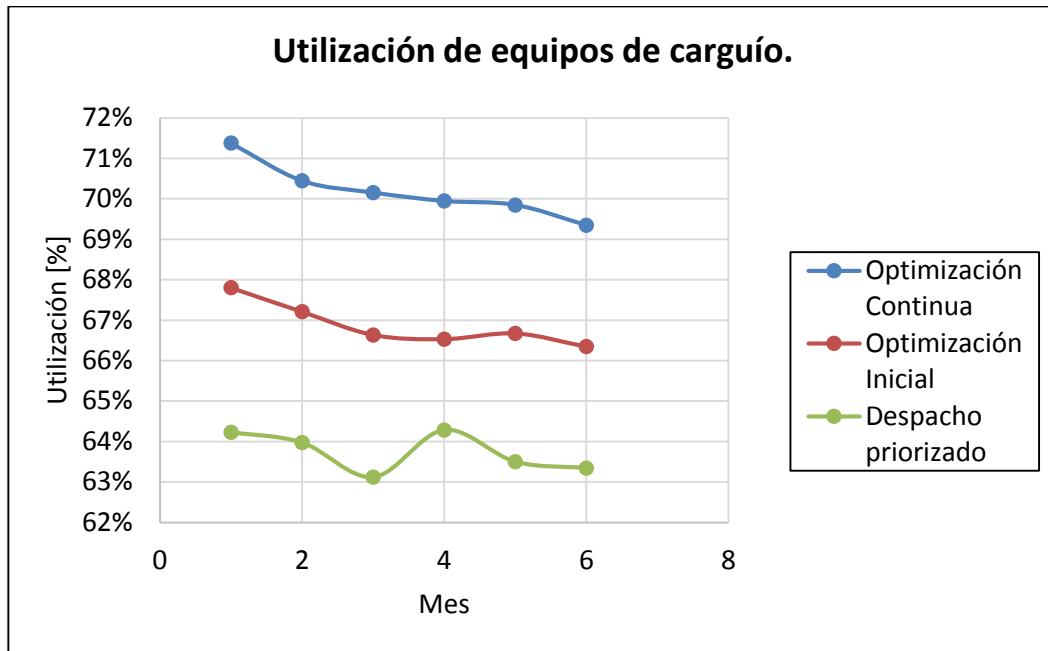


Figura 6-19: Utilización de equipos de carguío en el mediano plazo.

La tendencia observada en los gráficos corresponde a la misma observada en el ejercicio de corto plazo, en el que se saturaban las palas. La explicación en este sentido es la misma, debido a que al incrementar el tiempo de ciclo de los circuitos y considerando los mismos camiones, las rutas están menos congestionadas y existen menos colas en los puntos de descarga, por lo que para el caso de los camiones la utilización aumenta, mientras que para los equipos de carguío disminuye producto de que hay pérdidas operativas debido a que se debe esperar a los camiones, ya que su tiempo de ciclo es mayor. Se debe comentar, que la utilización de los equipos de carguío en los meses 3 y 4 para el despacho priorizado, no representa un comportamiento descendiente, lo cual puede deberse a que el orden en la asignación de la saturación de las palas haya cambiado.

Finalmente, se debe mencionar a modo de resumen que en este capítulo se simularon las tres estrategias de despacho, con la finalidad de compararlas en términos de movimiento total e índices operacionales, donde se obtiene que la estrategia de despacho con optimización continua resulta ser la más eficiente. En términos de la saturación de camiones se puede apreciar que a medida que el circuito tiene menos camiones, la utilización de éstos aumenta, mientras que la utilización de la flota de carguío disminuye. Lo anterior también se refleja en el análisis a mediano plazo, donde al poner los puntos de carga más lejos se genera un efecto de menor congestión.

7 EJERCICIO DE SIMULACIÓN DE CASO REAL

En el presente capítulo se describen las características principales de un ejercicio de simulación a corto plazo realizado en un *layout* real de la mina Escondida, donde se presenta la configuración física de la operación y sus componentes. Además, se detallan los *inputs* utilizados y siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3, se muestran los resultados obtenidos.

La mina Escondida, corresponde a la operación a rajo abierto que más cobre produce en el mundo anualmente, llegando a producir 265,697 toneladas entre concentrado y cátodos de cobre en el año 2016. Esta faena pertenece a la empresa BHP Billiton y se encuentra ubicada a 170 km al sureste de la ciudad de Antofagasta (Chile), y corresponde a una de las operaciones con la mayor cantidad de equipos de carguío y transporte en rajo abierto a nivel mundial.

El objetivo de este ejercicio es comprobar en primera instancia si se cumplen las mismas tendencias observadas en el caso sintético, además de verificar la eficiencia de los distintos tipos de despacho, en un ambiente de simulación que posee una alta cantidad de equipos en operación.

7.1. Descripción del caso

El caso de simulación a corto plazo de la mina busca estimar la productividad máxima de la operación dado un plan y comparar los resultados de las diferentes estrategias de despacho. En este caso se considera la utilización de 13 frentes de carga y 12 frentes de descarga (distribuidos entre chancadores, botaderos, pilas de lixiviación y *stocks*), además de contar con zonas de estacionamiento para realizar los cambios de turno, comedores para colaciones y dos talleres para reparar los camiones. La topografía de la mina se puede observar en la Figura 7-1, mientras que la configuración espacial de cada una de las componentes (*layout*) separado por sectores, se puede observar en las Figura 7-2, Figura 7-3 y Figura 7-4.

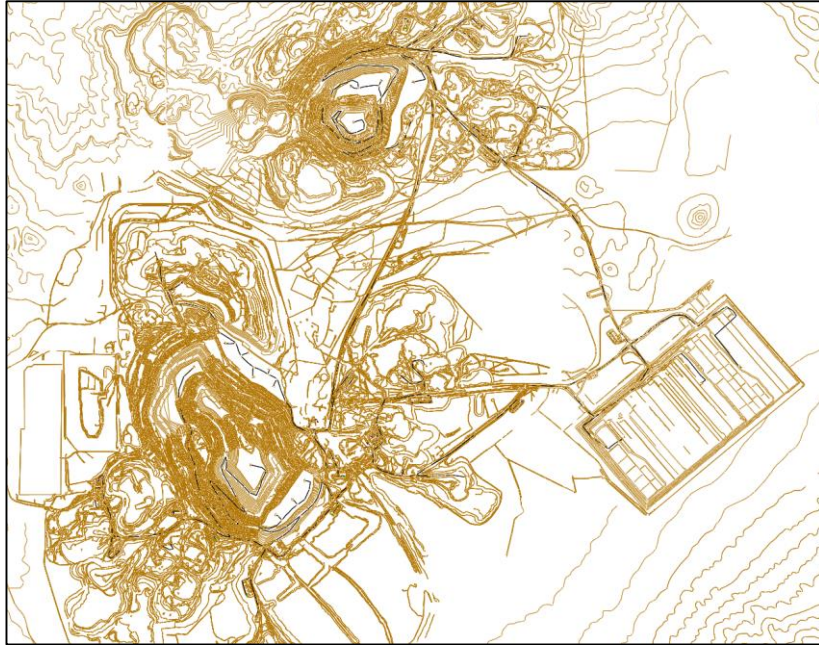


Figura 7-1: Topografía de Escondida

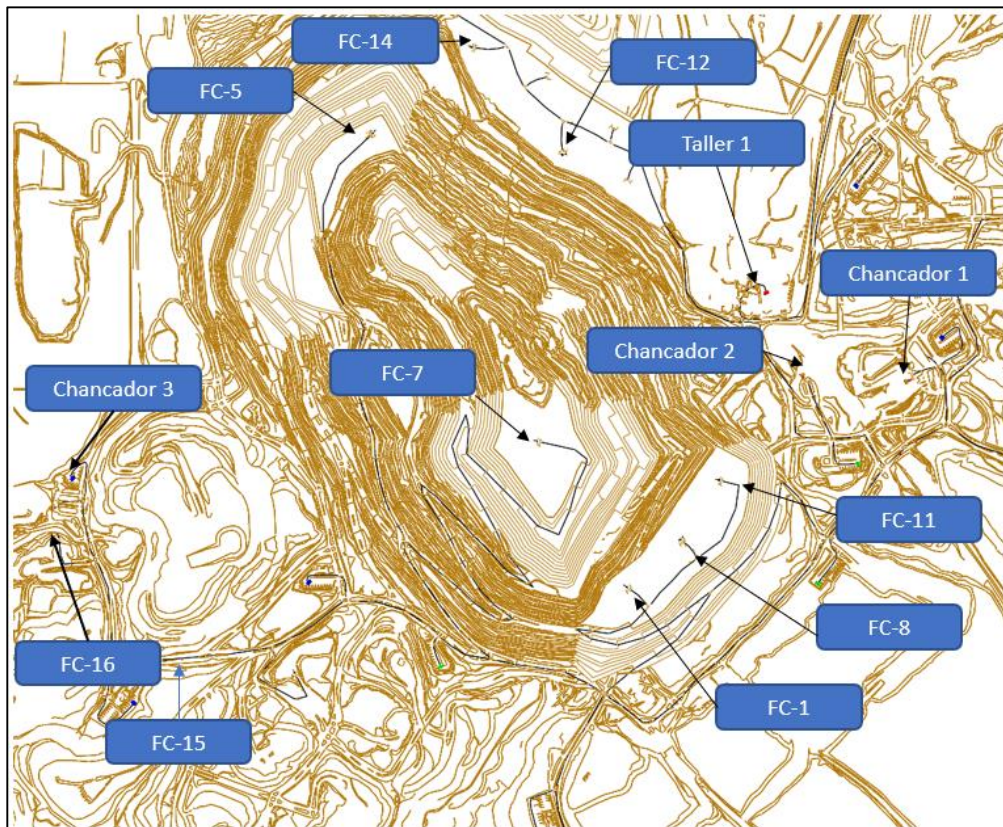


Figura 7-2: Layout de simulación Escondida. Sector Suroeste

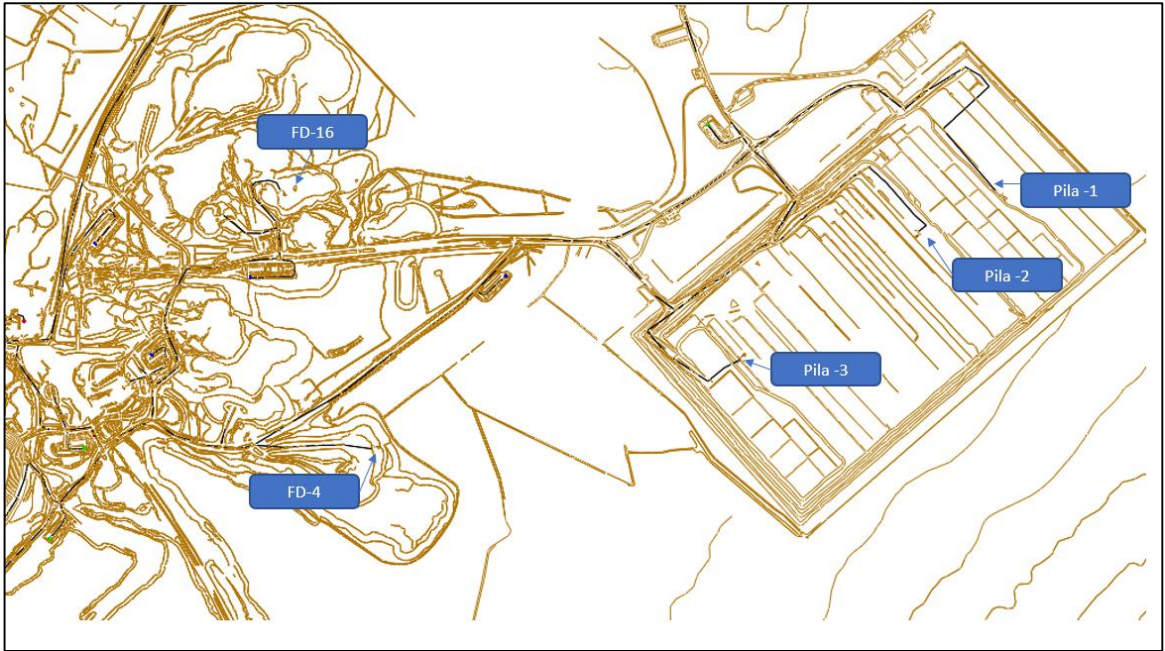


Figura 7-3: Layout de simulación Escondida. Sector Sureste



Figura 7-4: Layout de simulación Escondida. Sector Norte.

La simulación se basa completamente en un ejercicio de validación realizado en DSIM Open Pit, en el cual se define un plan dado por resultados propios de la operación. Además, se debe considerar que como se trata de un ejercicio de validación, las fallas que se consideran entre los equipos son fijas y tienen un horario determinado en que ocurren, por lo que en ambos casos la única variabilidad presente corresponde al factor de carga que presentan los equipos y el tiempo de carguío en los frentes de carga. Las distancias entre frentes de carga y descarga dadas por el plan a simular se pueden observar en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Distancia entre frentes de carga y descarga.

Frente de carga	Frente de descarga	Distancia [km]
FC-1	Pila-1	12.9
	FD-16	6.7
	Chancador-1	4.2
FC-2	Chancador-4	6.2
	Pila-1	18.0
FC-3	FD-2	5.3
	Chancador-4	4.0
FC-4	FD-1	3.6
	Chancador-3	16.6
	FD-17	5.1
FC-5	Chancador-1	7.5
	Pila-3	13.2
	FD-16	10.1
FC-7	Chancador-1	10.5
FC-8	Chancador-2	4.4
FC-9	Pila-2	14.2
	FD-17	8.6
FC-11	FD-4	6.3
FC-12	FD-4	5.5
FC-14	Pila-2	12.0
FC-15	Chancador-3	2.6
FC-16	Chancador-3	0.8

7.2. Input de simulación

Se cuenta con una flota de 160 camiones, de los cuales existen 5 tipos que se diferencian entre sí según su capacidad de carga. El número de equipos por cada tipo de camión y su respectiva carga se puede observar en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Tipos y número de camiones

Tipo de camión	Carga promedio [t]	Cantidad
A	233	13
B	290	6
C	325	39
D	351	2
E	354	100

Por otro lado, los tiempos de carga, acuatamiento y descarga utilizados en la simulación se pueden observar en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3: Tiempos de carga, descarga y acuatamiento.

Parámetros	Tiempo [s]
Tiempo de acuatamiento carga	54
Tiempo de acuatamiento descarga	30
Tiempo de carga	96
Tiempo de descarga	20

Las velocidades utilizadas en el modelo de optimización corresponden a una velocidad del equipo cargado y descargado. En este caso, el proyecto de validación contempla velocidades del equipo estando cargado y descargado, pero considerando además si es que está en pendiente en subida, bajada o se encuentra en plano, por lo que la velocidad utilizada corresponde al promedio de las velocidades cargado y descargado que se obtienen en la simulación con Dsim Open Pit, las cuales se pueden observar en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4: Velocidades utilizadas en el problema de optimización.

Parámetro	Velocidad [km/h]
Velocidad cargado	19.5
Velocidad descargado	34.5

Las velocidades utilizadas por zonas en la simulación del despacho priorizado, además del registro de falla de los camiones se pueden ver en la sección 10.1.2 del capítulo de Anexos. Por otro lado, se utilizan 13 equipos de carguío, los cuales para este ejercicio tienen una disponibilidad del 100%, donde 2 de estos equipos corresponden a cargadores frontales que pueden cargar un máximo de 233 [t] por camión, los cuales se encuentran ubicados en los frentes de carga “FC-15” y “FC-16”.

Se consideran dos cambios de turno que tienen una duración de 30 [min] y además tres colaciones, de las cuales la primera tiene una duración de 60 [min] y los dos restantes de 30 [min] cada una. Finalmente se adjunta el plan a simular el cual se puede observar en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5: Plan de producción.

Frente de carga	Frente de descarga	Meta producción [kt]
FC-1	Pila-1	34.7
	FD-16	6.8
	Chancador-1	53.6
FC-2	Chancador-4	26.2
	Pila-1	45.0
FC-3	FD-2	11.7
	Chancador-4	83.8
FC-4	FD-1	110.0
	Chancador-3	21.7
	FD-17	9.6
FC-5	Chancador-1	67.6
	Pila-3	16.8
	FD-16	5.5
FC-7	Chancador-1	120.0
FC-8	Chancador-2	52.3

Frente de carga	Frente de descarga	Meta producción [kt]
FC-9	Pila-2	85.1
	FD-17	7.8
FC-11	FD-4	104.1
FC-12	FD-4	388.0
FC-14	Pila-2	36.0
FC-15	Chancador-3	22.7
FC-16	Chancador-3	6.8

7.3. Resultados y análisis

Se realiza la simulación del caso considerando 10 réplicas (debido a la baja variabilidad) y se obtiene el movimiento total promedio extraído en un día de simulación, el cual se puede observar en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6: Extracción total promedio según tipo despacho.

Tipo de despacho	Extracción total [Mt]
Optimización continua	1.13
Optimización inicial	1.11
Despacho priorizado	1.06

Se puede observar que al igual que en los ejercicios de corto plazo, el movimiento total resulta mayor en la estrategia de optimización continua, siendo ésta un 6.6% mayor que en el caso del despacho priorizado y un 1.8% mayor que el caso de la optimización inicial, lo cual representa en términos de extracción de material un movimiento adicional de 70[kt] y 20[kt] respectivamente. El cumplimiento del plan de extracción se puede observar para los distintos frentes de carga, se puede observar en la Tabla 7-7.

Tabla 7-7: Cumplimiento del plan según tipo de despacho en frentes de carga.

Frente de carga	Frente de descarga	Meta producción [kt]	Optimización continua	Optimización inicial	Despacho priorizado
			Cumplimiento [%]	Cumplimiento [%]	Cumplimiento [%]
FC-1	Pila-1	34.7	100%	100%	100%
	FD-16	6.8	100%	100%	100%
	Chancador-1	53.6	100%	100%	100%
FC-2	Chancador-4	26.2	100%	100%	100%
	Pila-1	45.0	100%	100%	100%
FC-3	FD-2	11.7	100%	100%	100%
	Chancador-4	83.8	100%	100%	100%
FC-4	FD-1	110.0	100%	100%	100%
	Chancador-3	21.7	100%	100%	92%
	FD-17	9.6	100%	100%	34%
FC-5	Chancador-1	67.6	100%	100%	100%
	Pila-3	16.8	100%	100%	100%
	FD-16	5.5	100%	100%	100%
FC-7	Chancador-1	120.0	88%	100%	100%
FC-8	Chancador-2	52.3	100%	100%	100%
FC-9	Pila-2	85.1	81%	51%	100%
	FD-17	7.8	2%	2%	100%
FC-11	FD-4	104.1	100%	100%	100%
FC-12	FD-4	388.0	62%	59%	37%
FC-14	Pila-2	36.0	100%	100%	100%
FC-15	Chancador-3	22.7	100%	100%	100%
FC-16	Chancador-3	6.8	100%	100%	100%

Desde la Tabla 7-7 se puede observar que en general el cumplimiento es de 100% en casi todos los frentes de carga, exceptuando los siguientes frentes: FC-4, FC-7, FC-9 y FC-12 (destacados en negrita). Como se observó en el capítulo 6, la asignación del despacho priorizado satura las palas en un orden secuencial sin importar la meta productiva, por lo que en este caso, para el FC-12 que tenía el mayor movimiento de material, se tiene uno de los más bajos cumplimientos en el caso de este despacho.

Por otro lado, se puede observar frentes de carga en donde el cumplimiento es mayor en el caso del despacho priorizado, respecto a los casos donde se optimiza (como por ejemplo el frente de carga FC-7 y FC-9), lo cual se debe netamente a que corresponden a circuitos que tienen un alto tiempo de ciclo (distancia entre origen y destino de 10.5 y 14.2 [km] respectivamente), por lo que al maximizar la productividad, éstos no son tan prioritarios respecto al global del sistema.

El cumplimiento más bajo por parte del modelo de optimización se da en el frente de carga FC-12 (no se considera el FC-9 debido a que al no cumplir el plan en el destino “Pila-2”, no realiza el siguiente destino que es “FD-17”, donde se obtiene 2% de cumplimiento entre todas las réplicas, además, el tonelaje resulta ínfimo respecto al del FC-12), por lo que se realiza un análisis adicional para comprobar si es factible éste plan el cual se detalla a continuación:

- La productividad máxima de un equipo de carguío se puede calcular según la ecuación (2.7) considerando que la disponibilidad es un 100%, por lo que al considerar que la carga promedio del camión es de 330 [t] y que el tiempo de carga es cercano a los 96 [s], se tiene que la productividad máxima del equipo es la siguiente:

$$P_i = \frac{330[t]}{96[s]} \cdot 3,600 \left[\frac{s}{h} \right] = 12,375 \left[\frac{t}{h} \right] \quad (7.1)$$

- Considerando que se tienen 2 horas de pérdida productiva por colación, además de 1 hora de pérdida por cambio de turno, el tiempo operativo de la pala corresponde a 21 [h], por lo que la producción máxima que podría generar la pala es la siguiente:

$$\text{Prod}_{\text{máx}} = 12,375 \left[\frac{t}{h} \right] \cdot 21 [h] = 259,875 [t] \quad (7.2)$$

- Este valor en particular representa un cumplimiento de 67% para el caso del FC-12, por lo cual se entiende que el plan utilizado es imposible de cumplir.

Además, el cumplimiento general del plan según el tipo de despacho se puede observar en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8: Cumplimiento general del plan por tipo de despacho.

Tipo de despacho	Meta de producción [kt]	Extracción total [kt]	Cumplimiento [%]
Optimización continua	1,316	1,130	86%
Optimización inicial	1,316	1,109	84%
Despacho priorizado	1,316	1,065	81%

Se puede observar de la Tabla 7-8, que el cumplimiento total con la optimización continua corresponde a un 86% de cumplimiento, siendo un 6.1% mejor que el despacho priorizado y un 1.9% mejor el que despacho con optimización inicial. Si se considera la producción máxima calculada en el análisis de productividad (ecuación 7.2) como la meta a cumplir del frente de carga (FC-12), el cumplimiento del plan puede llegar al 95% (ver Tabla 7-9).

Tabla 7-9: Cumplimiento del plan considerando escenario de producción máxima

Tipo de despacho	Meta de producción [kt]	Extracción total [kt]	Cumplimiento [%]
Optimización continua	1,188	1,130	95%
Optimización inicial	1,188	1,109	93%
Despacho priorizado	1,188	1,065	90%

Por otro lado, desde la simulación se puede obtener la distribución de tiempos operativos, tanto de los camiones como de los equipos de carguío, la cual se puede observar en las Figura 7-5 y Figura 7-6 .

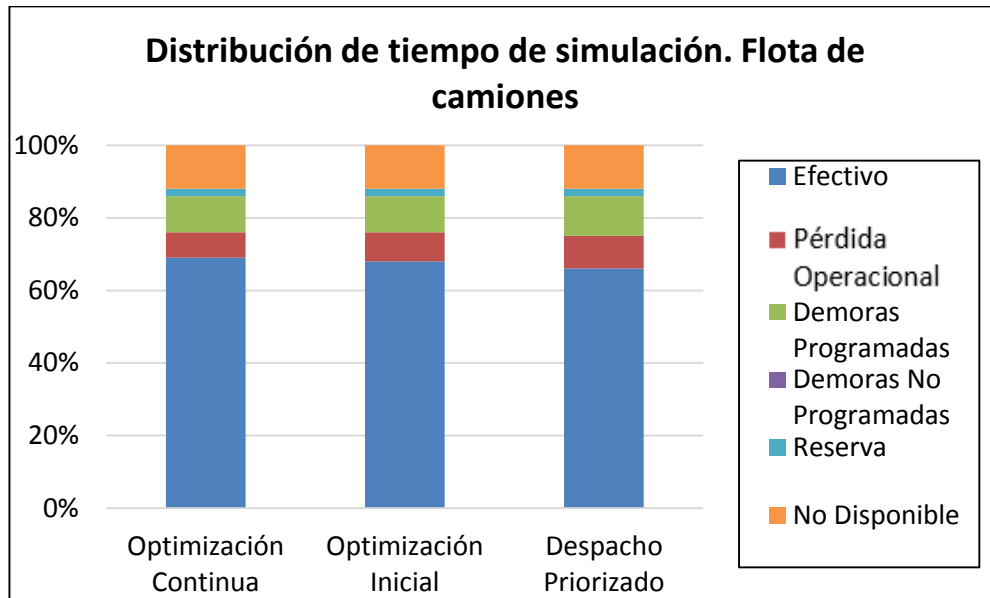


Figura 7-5: Distribución de tiempos de simulación según tipo de despacho. Flota de camiones.

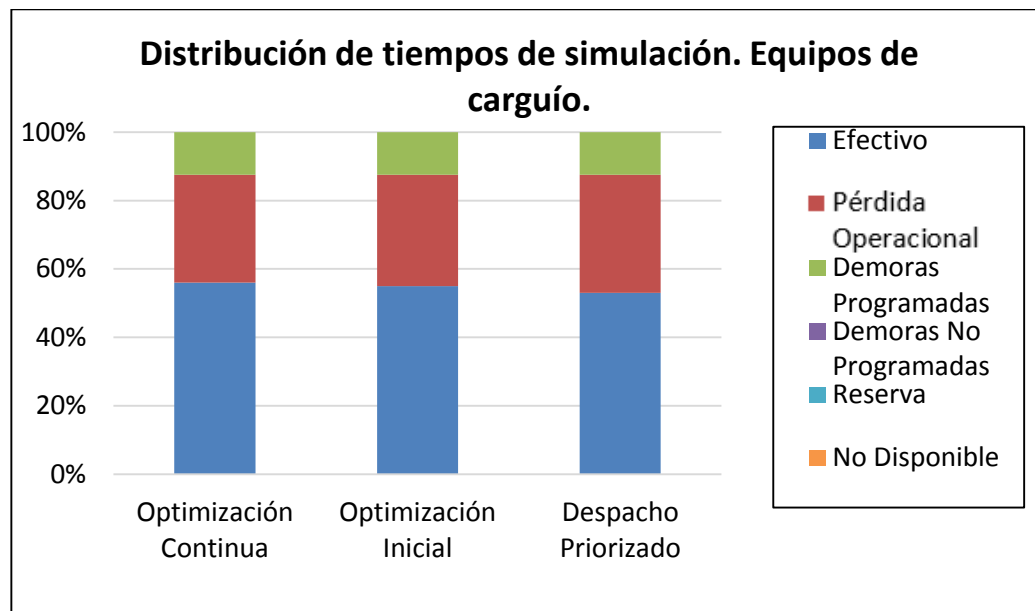


Figura 7-6: Distribución de tiempos de simulación según tipo de despacho. Equipos de carguío.

Desde las figuras anteriores, se puede observar las mismas tendencias que el caso sintético, en donde los modelos de optimización tienen un mayor tiempo efectivo y menos pérdidas operacionales respecto al despacho priorizado. Al obtener la distribución de tiempos de la

simulación, se puede calcular la utilización de los equipos en la simulación, cuyos valores se pueden observar en la Tabla 7-10.

Tabla 7-10: Utilización de equipos en la simulación

Tipo de despacho	Utilización flota de camiones [%]	Utilización de equipos de carguío [%]
Optimización continua	78%	56%
Optimización inicial	77%	55%
Despacho priorizado	75%	53%

De la Tabla 7-10 se puede observar la misma tendencia en cuanto a la utilización de equipos que en el caso de simulación a corto y mediano plazo, en donde existe una mayor utilización de la flota de carguío y transporte en los despachos que consideran el problema de optimización, lo cual confirma que se está maximizando la productividad, y que el hecho de considerar un nuevo despacho en el instante que ocurren eventos operacionales como fallas de equipos, hace de que el aumento sea aún mayor. Lo anterior se sustenta en que el despacho priorizado, nunca toma en cuenta el *target* de la producción, además de no tomar en cuenta las diferentes disponibilidades de los equipos en la simulación, por lo que considerar un problema de optimización que incorpore estos factores, hace que las asignaciones sean más productivas.

Por otro lado, al realizar las simulaciones se puede apreciar que se tardan bastante tiempo en completar cuando se utilizan los despachos que consideran un problema de optimización, lo cual se debe a que este ejercicio corresponde a uno de los modelos más grandes que se pueda simular en minería a cielo abierto. Al cuantificar cuántas veces se resuelve el problema de optimización para generar el despacho de los camiones, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 7-11: Ejecuciones del problema de optimización según sistema de despacho.

Tipo de despacho	N° de ejecuciones del problema de optimización	Frecuencia de ejecución [min]
Optimización continua	174	8.3
Optimización inicial	22	65.5

El despacho priorizado no resuelve ningún tipo de optimización, sin embargo, el camión se resigna a un circuito cada vez que termina de descargar, lo que ocurre con una frecuencia mayor que cualquiera de los dos casos que consideran el problema de optimización. Considerando lo anterior, el tiempo para calcular 30 réplicas se puede observar en la Tabla 7-12.

Tabla 7-12: Tiempo de cálculo de simulación según sistema de despacho.

Tipo de Despacho	Tiempo para completar simulación [min]
Optimización continua	288
Optimización inicial	60
Despacho priorizado	24

Si bien la resolución del problema de optimización es relativamente rápida, la cantidad de veces que debe realizarse hace que la simulación se demore excesivamente, ya que cada vez que se realiza se detiene la simulación.

Finalmente, se debe mencionar a modo de resumen que en este capítulo se simularon las tres estrategias de despacho en un *layout* perteneciente a la mina Escondida, donde se contaba con datos reales sobre las fallas de los equipos durante un día de simulación. A grandes rasgos se obtienen las mismas tendencias que en el caso sintético respecto a la productividad e índices productivos, producto de que la optimización, al considerar diferencias entre los equipos y el movimiento global de la operación, genera asignaciones con mayor productividad entre las diferentes réplicas respecto al despacho priorizado.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8.1. Conclusiones

En este trabajo se propone un modelo integrado de simulación y optimización del despacho para operaciones mineras a cielo abierto, el cual tiene como objetivo principal aumentar la productividad del sistema de transporte de materiales (pala-camión). A continuación, se detallan las principales conclusiones de este trabajo:

En primer lugar, la metodología utilizada propone la interacción de un modelo de optimización que genera el despacho óptimo de los camiones y un modelo de simulación que evalúa esta asignación en tiempo real. Esta metodología se implementa de dos maneras, las cuales se comparan con un caso base de un simulador validado.

En la simulación de los escenarios a corto plazo, se observa que a medida que los circuitos se van saturando, sin importar el tipo de despacho que se utilice, se puede llegar a la productividad máxima de la operación. Sin embargo, llegar a ese estado de saturación no necesariamente representa condiciones factibles económicamente, debido a que se necesita una cantidad de camiones demasiado alta para poder obtener esta productividad.

Las curvas de saturación del caso sintético, muestran que las estrategias de optimización continua y optimización inicial siempre están por sobre el rendimiento de la estrategia de despacho priorizado, excepto cuando se alcanza la saturación, llegando a obtener mejoras de hasta un 6.6% de rendimiento en los casos en que el circuito no se encuentra saturado. Este aumento de productividad está dado tanto por considerar que los equipos de transporte son distintos en términos de disponibilidad, como también por recalcular el despacho cuando ocurren variaciones operacionales importantes, siendo este último el factor de mayor importancia.

El análisis de asignación de equipos a los frentes de descarga en los despachos que consideran un problema de optimización, muestra que en general se asignan los equipos con mayor disponibilidad a los circuitos más cortos con la finalidad de tener una mayor productividad. Lo anterior se ve modificado si es que circuitos con mayor tiempo de ciclo poseen un requerimiento mayor de tonelaje en los frentes de descarga, ya que en estos casos el modelo intenta cumplir esta

productividad y lo consigue asignando camiones con mayor disponibilidad a estos circuitos. Por otro lado, la asignación en el caso del despacho priorizado es totalmente al azar, debido a que no se considera este factor para realizar el despacho.

El horizonte de evaluación de productividad considerado en el problema de optimización del despacho muestra que a medida que el horizonte es menor se tiene un mejor rendimiento global del sistema (2.4% de aumento productivo respecto a la optimización inicial), y que a medida que este horizonte crece la solución tiende a la del problema de optimización inicial en términos de asignación. Lo anterior se debe a que mientras más corto es el horizonte de evaluación, el equipo de transporte es más propenso a quedarse en el circuito en el que está, debido a que cambiar de circuito, en general, significará una pérdida productiva a menos que el circuito donde se dirija posea tiempos de ciclos menores que hagan que este equipo sea más productivo, por lo que cambiarse de circuito en ese caso significa un aumento productivo.

Respecto al ejercicio de mediano plazo, se puede observar que un aumento de 300[m] en los circuitos tiene un efecto de disminución productiva entre un 2-3 % respecto al rendimiento inicial. Si bien el efecto no resulta tan significativo, establece que al menos no se puede realizar un plan basándose en el estado inicial para los casos de mediano y largo plazo. Por otro lado, si la variación del *layout* es pequeña respecto al largo de los circuitos, considerar una posición del equipo a nivel mensual resulta ser lo suficientemente representativa, por lo que se pueden realizar análisis de producción y atrasos de fases en el mediano plazo.

En cuanto a la simulación, el efecto de considerar el problema de optimización del despacho respecto a considerar el problema con un horizonte de evaluación en términos de resultados no tiene un impacto significativo (según lo revisado en este trabajo, hasta un 2.4 %), por lo que dependiendo de lo que se quiera analizar, en algunas situaciones sería más útil considerar el modelo de optimización inicial, debido a que en casos donde el número de variables es muy grande el tiempo de resolución del problema comienza a ser considerable.

Si bien el modelo de optimización intenta maximizar la productividad, la asignación generada no necesariamente es la óptima en términos de productividad. Lo anterior se debe a que el modelo considera una sola ruta de asignación entre los frentes de carga y descarga, por lo que

puede llegar un punto en que si se producen demasiadas asignaciones que compartan una ruta, se producirán interacciones entre los equipos, que se transformarán en pérdidas operativas y disminuirán la productividad total.

Los resultados de la simulación del caso real muestran las mismas tendencias que el caso sintético respecto al rendimiento y cumplimiento según el tipo de despacho, en donde existe una ganancia productiva del 6.6% entre el modelo de optimización respecto el despacho priorizado. Además, se puede observar que, al maximizar la productividad de la operación, el modelo no es capaz de cumplir el plan debido a que está sobredimensionado, por lo cual se declara como infactible. En este sentido el modelo integrado de simulación y optimización cumple las expectativas esperadas, ya que se puede utilizar tanto para saber si un plan puede mejorar, como también para rechazar un plan, producto de que está sobredimensionado, lo cual representa una ventaja respecto a métodos deterministas y simulación tradicional.

8.2. Trabajo Futuro

A partir de lo desarrollado en este trabajo, se podrán realizar las siguientes extensiones:

- En primera instancia, la metodología de optimización y simulación es bastante genérica debido a que se consideran variaciones operacionales para resolver un problema de optimización. Tanto las variaciones operacionales, como el modelo de optimización, pueden ser cambiados a la hora de determinar un tipo de despacho, por lo que se pueden probar distintas configuraciones que busquen otro objetivo, como minimizar costos de operación y desviaciones con el plan o que aumenten índices operativos como disponibilidad y utilización.
- El modelo se restringe en el sentido de que solo puede usar una ruta para la asignación entre los equipos de carguío y transporte, la cual para este caso corresponde a la más corta en términos de distancia. En particular se puede considerar la variación de las rutas con la finalidad de incorporar la saturación de una ruta al modelo de optimización, de modo que no se produzca una sobresaturación en el flujo de una ruta.

- Por otro lado, el modelo propone una restricción de cumplimiento del *budget* en los frentes de descarga, la cual ayuda a cumplir el plan. Sin embargo, esta restricción no funciona del todo bien cuando más de un equipo de carguío alimenta al frente de descarga, ya que como se intenta maximizar el movimiento de material, el despacho obtenido prefiere asignar los camiones al circuito más corto, por lo que en trabajos futuros se debe trabajar en una restricción que integre más de una fuente de alimentación en el frente de descarga.
- La productividad calculada en el modelo considera el tiempo de ciclo en su forma más simple, la cual corresponde a tiempo de viaje cargado y descargado junto con tiempos de carga y descarga. Esto debería ser modificado a futuro para tener una correcta estimación de la productividad, incorporando distintos perfiles de velocidad en la ruta y que, en vez de ser estimados, sean tomados directamente de la simulación para tener un valor más preciso a la hora de resolver el problema.
- Por otro lado, desde los resultados de mediano plazo se puede observar la disminución de la productividad en el tiempo, y la baja en los índices de utilización de los equipos de carguío. En particular se podría utilizar este tipo de análisis para determinar cuándo es conveniente realizar inversiones de equipos (como palas o camiones).
- Finalmente, esta metodología se podría extender al largo plazo, en donde se podría observar la pérdida productiva real que tendría la operación, con el objetivo de retroalimentar planes de producción para que estos realmente se puedan cumplir.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Alarie, S., & Gamache, M. (2002). *Overview of solution strategies used in truck dispatching system for open pit mines*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 16, No. 1, págs. 59-76.
- Askari-Nasab, H., & Torkamani, E. (2013). *Truck-Shovel operational planning using discrete event simulation*. Mining Optimization Laboratory: University of Alberta, Canada.
- Banks, J. (1984). *Discrete Event System Simulation*. Pearson Education India.
- Burt, C., & Caccetta, L. (2009). *Equipment Selection for Surface Mining: A Review*.
- Çetin, N. (2004). *Open-Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation*. Ph. D. Tesis. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- CODELCO. (2005). *Norma ASARCO*. Documento Interno, División Codelco Norte.
- Dijkstra, E. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische mathematik, Vol. 1, No. 1, págs. 269-271.
- García, E.; García, H.; Cárdenas, L. (2006). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*. México: Pearson Educación.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introduction to mining engineering*. John Wiley & Sons.
- Johnson, T. (1968). *Optimum open-pit mining production scheduling*. (U. o. California, Ed.) Berkeley: PhD. Thesis.
- Manríquez, F. (2015). *Tesis de Magíster: Evaluación de la incertidumbre geológica en planes mineros a corto plazo en faenas a cielo abierto*. Santiago, Chile.: Universidad de Chile.
- Mena, R.; Zio, E.; Kristjanpoller, F.; Arata, A. (2013). *Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic*

- constraints*. International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 23, No. 1, págs. 113-119.
- Najor, J. H. (2006). *Capacity constrained production scheduling*. In Proceedings of the 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. págs. 1173-1178.
- Newman, A.; Rubio, E.; Caro, R.; Weintraub, A.; Eurek, K. (2010). *A review of operations research in mine planning*. Interfaces, Vol. 40, No. 3, págs. 222-245.
- Pérez, J. (2017). *Tesis de Magíster: Metodología de estimación de producción en minería subterránea selectiva atendiendo a incertidumbre operacional y parámetros geomecánicos*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Sáez, N. (2014). *Tesis de Magíster: Simulación on-line para el despacho de camiones mineros en operaciones a cielo abierto*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Soumis, F. E. (1989). *Truck dispatching in an open pit mine*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1989, Vol. 3, No. 2, págs. 115-119.
- Torkamani, E. (2013). *Linkage of Truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete event simulation*. Master of Science Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering.: University of Alberta.
- Valdez, F., & Orosco, M. (2011). *Programación lineal en gestión de operaciones mineras*. Preprint.
- Wayne, W. L., & Goldberg, J. B. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. Editorial Thompson.
- Weintraub, A. B. (1987). *A truck dispatching system for a large open pit mine*. Operational Research, 1987, Vol. 87, págs. 650-662.
- White, J., & Olson, J. (1986). *Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives*. Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States), Vol. 38, No. 11.

White, J., & Olson, J. (1992). *On improving truck/shovel productivity in open pit mines*. CIM bulletin, Vol. 86, págs. 43-43.

Whittle, J. (1989). *The facts and fallacies of open pit design*. Balwyn North, Victoria , Australia: Whittle Programming Pty Ltd.

10 ANEXOS

10.1. Anexo A: Inputs

10.1.1 Ejercicio a corto plazo

A continuación, se muestran las fallas utilizadas por los equipos de carguío y transporte en la simulación.

Tabla 10-1: Distribuciones de falla camiones y palas.

Nombre	Distribución entre fallas	Distribución reparación	Tiempo entre fallas [h]	Tiempo para reparar [h]	Disponibilidad
T_01	45* weibull(2.1)	lognormal(1.44,0.99)	39.9	7.6	84.0%
T_02	55* weibull(1.4)	lognormal(1.36,1.06)	50.0	7.1	87.5%
T_03	34* weibull(2.5)	lognormal(1.57,0.96)	30.1	7.8	79.4%
T_04	44* weibull(1.3)	lognormal(1.5,1.22)	40.2	9.2	81.4%
T_05	45* weibull(2)	lognormal(1.16,1.16)	39.2	5.8	87.0%
T_06	34* weibull(1.9)	lognormal(1.13,0.92)	30.2	4.9	86.0%
T_07	50* weibull(1.5)	lognormal(1.46,1.03)	44.9	7.7	85.3%
T_08	52* weibull(2.3)	lognormal(1.55,1.1)	46.0	8.4	84.6%
T_09	41* weibull(2.1)	lognormal(1.25,0.99)	35.8	5.7	86.2%
T_10	38* weibull(1.1)	lognormal(1.22,1.22)	36.5	7.4	83.2%
T_11	44* weibull(1.4)	lognormal(1.36,1.19)	41.4	8.3	83.2%
T_12	32* weibull(1.6)	lognormal(1.34,1.25)	28.3	7.6	78.9%
T_13	48* weibull(1.3)	lognormal(1.48,1.13)	44.2	7.8	85.0%
T_14	52* weibull(1)	lognormal(1.59,1.1)	51.3	8.2	86.2%
T_15	49* weibull(1.5)	lognormal(1.61,1.22)	44.1	10.8	80.3%
T_16	41* weibull(1.7)	lognormal(1.44,0.96)	36.7	6.6	84.8%
T_17	38* weibull(1.8)	lognormal(1.31,0.99)	33.9	5.8	85.4%
T_18	33* weibull(1.7)	lognormal(1.1,1.06)	28.6	5.4	84.1%
T_19	43* weibull(1.5)	lognormal(1.22,0.96)	38.3	5.3	87.7%
T_20	33* weibull(1.5)	lognormal(1.41,1.19)	29.4	7.9	78.9%
T_21	45* weibull(2.1)	lognormal(1.44,0.99)	41.1	7.0	85.4%
T_22	55* weibull(1.4)	lognormal(1.36,1.06)	49.8	6.6	88.3%
T_23	34* weibull(2.5)	lognormal(1.57,0.96)	30.6	8.1	79.2%
T_24	44* weibull(1.3)	lognormal(1.5,1.22)	39.2	9.2	80.9%

Nombre	Distribución entre fallas	Distribución reparación	Tiempo entre fallas [h]	Tiempo para reparar [h]	Disponibilidad
T_25	45* weibull(2)	lognormal(1.16,1.16)	40.0	5.8	87.3%
T_26	34* weibull(1.9)	lognormal(1.13,0.92)	31.2	4.8	86.8%
T_27	50* weibull(1.5)	lognormal(1.46,1.03)	46.8	7.4	86.4%
T_28	52* weibull(2.3)	lognormal(1.55,1.1)	46.9	9.0	83.9%
T_29	41* weibull(2.1)	lognormal(1.25,0.99)	35.9	5.7	86.4%
T_30	38* weibull(1.1)	lognormal(1.22,1.22)	37.5	7.0	84.3%
T_31	44* weibull(1.4)	lognormal(1.36,1.19)	40.5	7.6	84.3%
T_32	32* weibull(1.6)	lognormal(1.34,1.25)	28.4	8.9	76.2%
T_33	48* weibull(1.3)	lognormal(1.48,1.13)	44.0	8.2	84.3%
T_34	52* weibull(1)	lognormal(1.59,1.1)	55.0	8.5	86.7%
T_35	49* weibull(1.5)	lognormal(1.61,1.22)	44.6	10.2	81.4%
T_36	41* weibull(1.7)	lognormal(1.44,0.96)	36.4	7.4	83.2%
T_37	38* weibull(1.8)	lognormal(1.31,0.99)	33.2	6.0	84.6%
T_38	33* weibull(1.7)	lognormal(1.1,1.06)	30.6	5.0	86.0%
T_39	43* weibull(1.5)	lognormal(1.22,0.96)	39.7	5.5	87.9%
T_40	33* weibull(1.5)	lognormal(1.41,1.19)	29.8	9.3	76.3%
S_01	Triangular (20,24,28)	Triangular (2,3,4)	24.0	3.0	87.5%
S_02	Triangular (20,24,28)	Triangular (2,3,4)	24.0	3.0	87.5%
S_03	Triangular (20,24,28)	Triangular (2,3,4)	24.0	3.0	87.5%

Tabla 10-2: Match pala-camión

Tipo Camión	Distribución de tiempo de carga	Distribución de factor de carga
A	Triangular(140,150,160)	Triangular(315,330,345)
B	Triangular(140,150,160)	Triangular(320,330,340)

10.1.2 Ejercicio de simulación de caso real

10.1.2.1 Distribuciones de velocidad



Figura 10-1: Perfil de velocidad por ruta.

Tabla 10-3: Distribución de velocidad por zona

Ruta	Velocidad subida vacío [km/h]	Velocidad subida cargado [km/h]	Velocidad horizontal vacío [km/h]	Velocidad horizontal cargado [km/h]	Velocidad bajada vacío [km/h]	Velocidad bajada cargado [km/h]
Verde	23	12	33	28	33	14
Azul	23	12	42	35	33	14
Amarilla	23	12	34	30	33	14
Magenta	23	12	41	35	33	14

Tabla 10-4: Fallas de camiones en la simulación

Tipo de camión	Inicio de falla [h]	Tiempo de reparación [h]
A	17.8	1.3
A	18.8	5.3
A	11.1	4.7
A	4.6	6.0
B	0.0	16.0
B	2.5	8.7
B	19.0	0.7
C	14.5	1.3
C	6.2	7.0
C	11.6	0.3
C	9.5	1.0
C	0.0	9.3
C	16.0	0.7
C	6.7	4.7
C	0.0	6.3
C	10.1	11.7
C	8.8	18.7
C	9.6	9.7
C	13.5	7.0
C	11.8	12.7
C	8.7	12.3
C	2.3	2.7
C	12.3	9.7
C	11.4	5.0
C	16.0	0.3
C	18.1	1.0
D	9.8	1.0
E	14.0	10.0
E	6.0	19.0
E	9.4	6.0
E	9.8	12.7
E	4.8	0.3
E	0.5	3.3
E	11.4	11.7
E	12.3	1.3
E	8.3	0.7
E	16.3	0.7

Tipo de camión	Inicio de falla [h]	Tiempo de reparación [h]
E	23.0	1.0
E	0.0	4.7
E	1.5	16.3
E	14.0	0.7
E	6.0	12.7
E	18.5	0.3
E	16.1	7.7
E	17.0	1.7
E	19.0	0.3
E	16.3	4.0
E	11.5	9.3
E	2.0	5.0
E	0.0	2.3
E	11.5	13.0
E	12.5	7.7
E	0.0	0.7
E	12.1	5.0
E	13.6	1.3
E	6.0	21.0
E	8.3	4.3
E	18.6	4.0
E	0.0	6.3
E	0.5	3.3
E	4.0	0.3
E	0.0	0.7
E	13.3	3.0
E	4.5	7.7
E	0.0	7.3
E	18.0	6.0
E	1.3	0.7
E	11.0	4.7
E	14.3	3.0
E	10.1	15.7
E	11.5	5.7

10.2. Anexo B: Resultados

10.2.1 Resultados de ejercicio a corto plazo

10.2.1.1 Resultados para 34 camiones

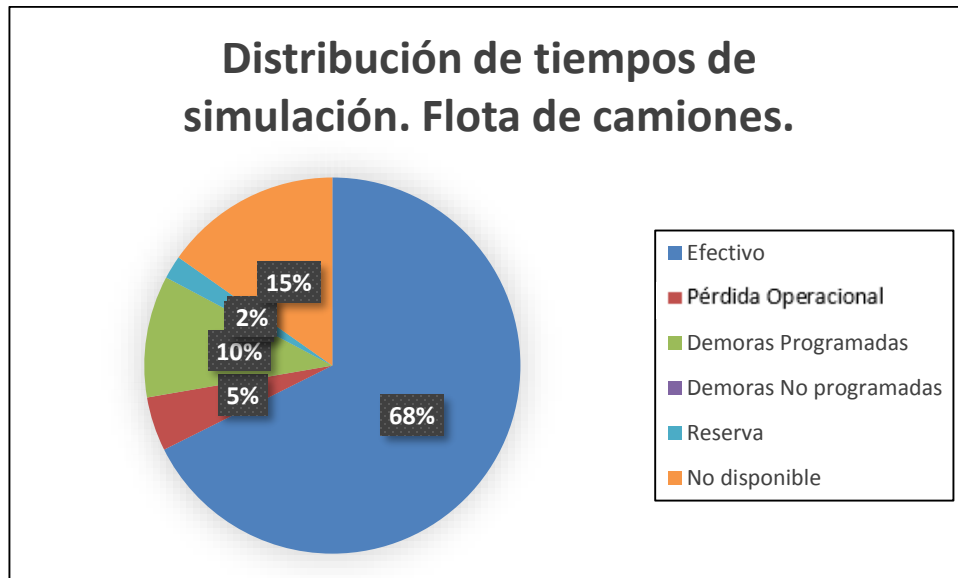


Figura 10-2: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (34 camiones).

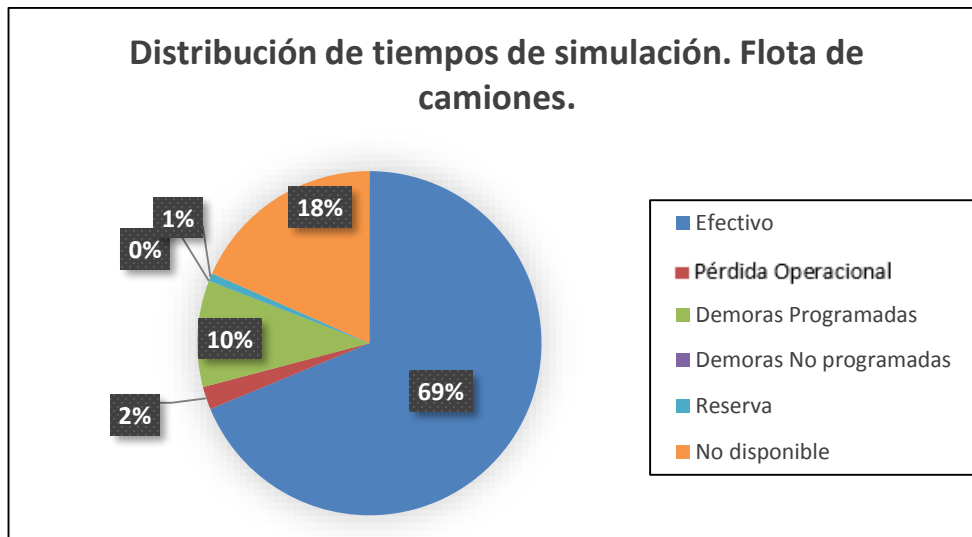


Figura 10-3: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (34 camiones).

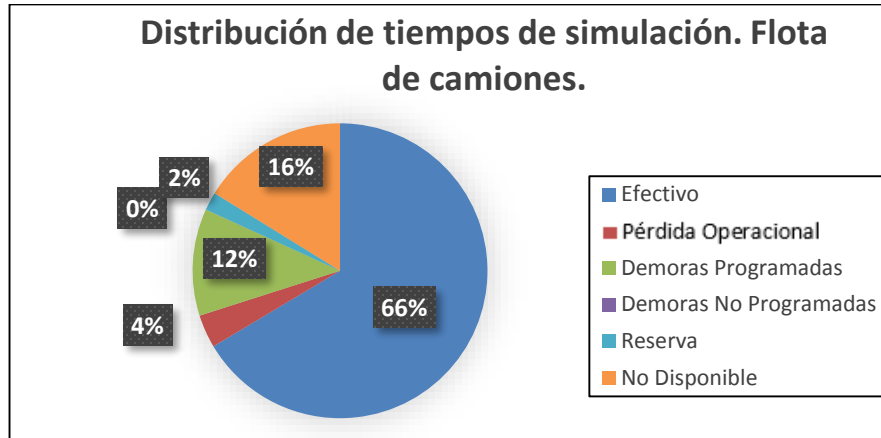


Figura 10-4: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (34 camiones).

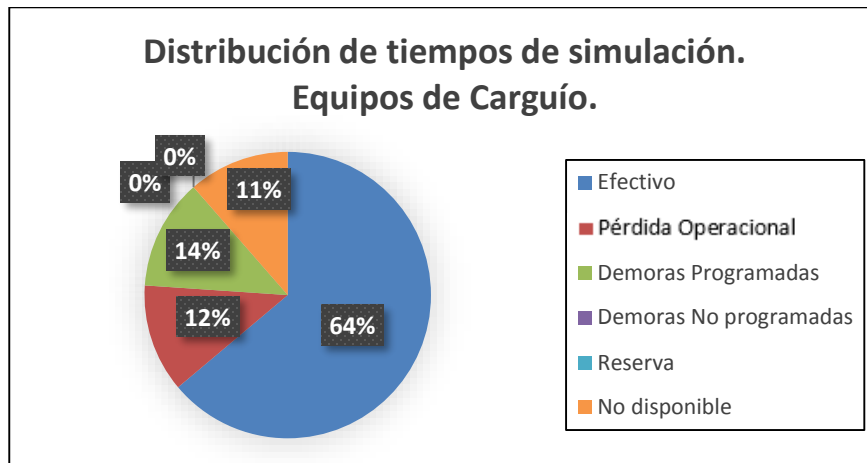


Figura 10-5: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (34 camiones)

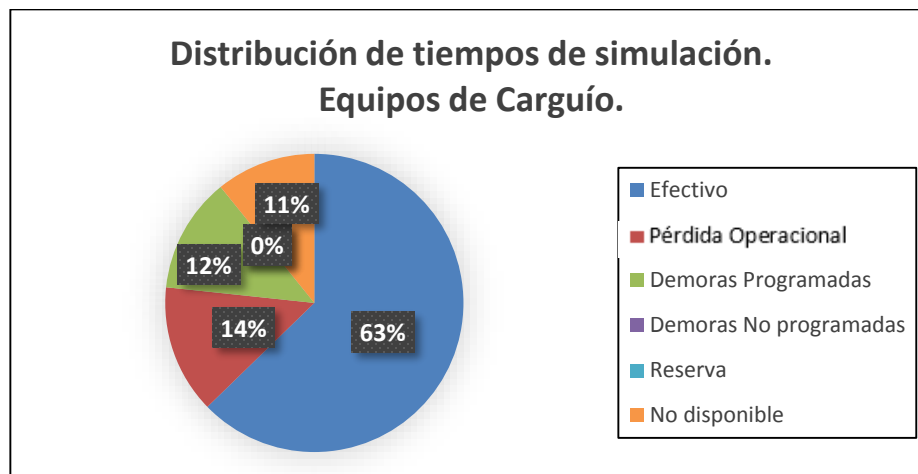


Figura 10-6: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (34 camiones)

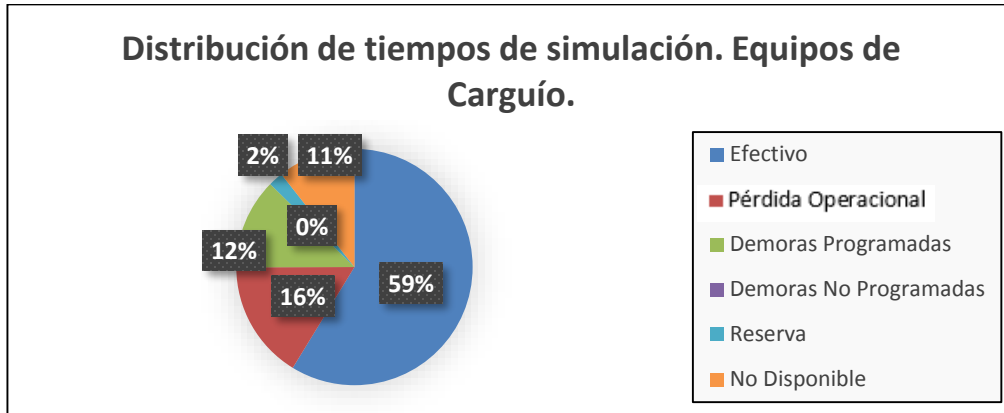


Figura 10-7: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (34 camiones)

10.2.1.2 Resultados para 32 camiones

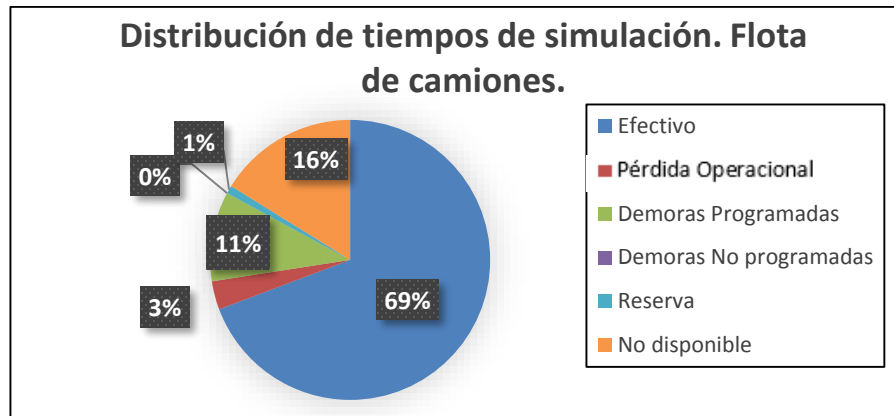


Figura 10-8: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (32 camiones).

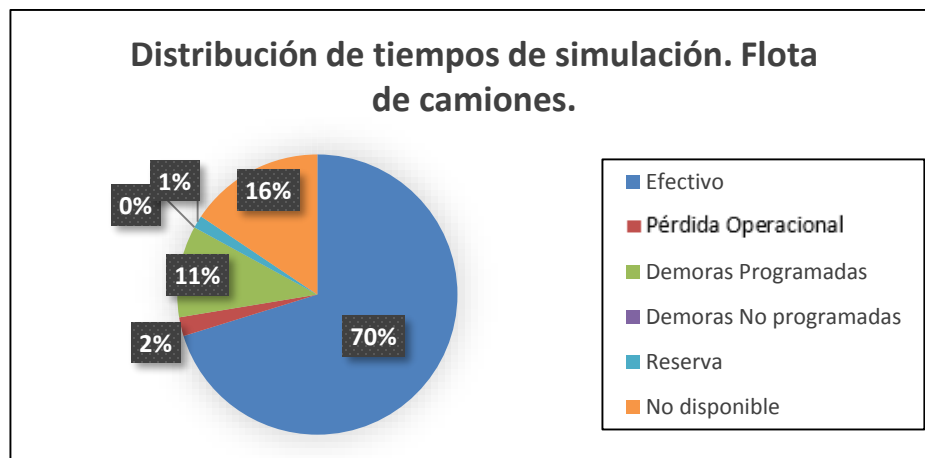


Figura 10-9: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (32 camiones).

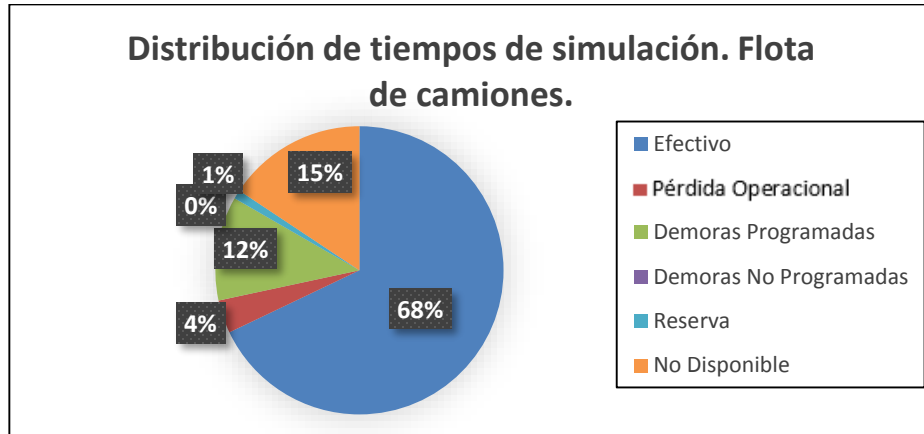


Figura 10-10: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (32 camiones).

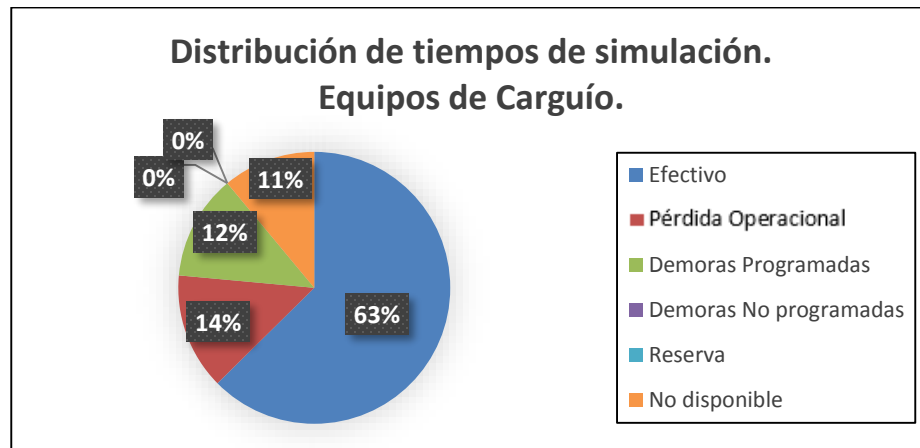


Figura 10-11: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (32 camiones)

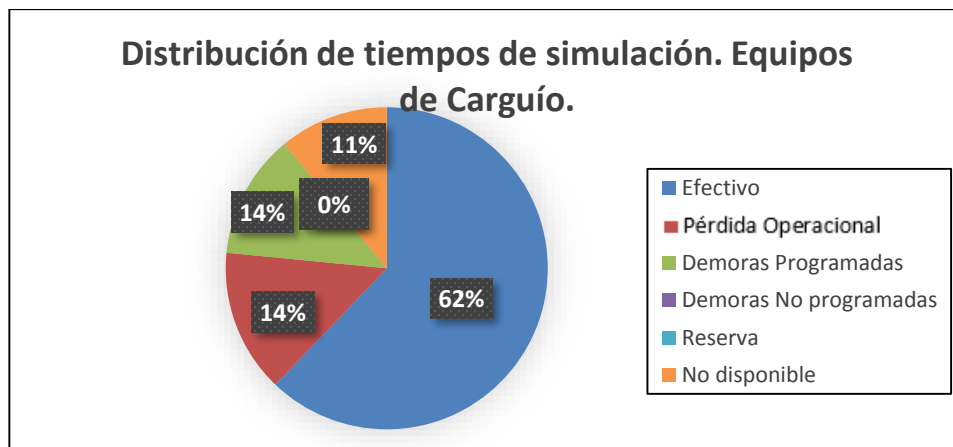


Figura 10-12: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (32 camiones)

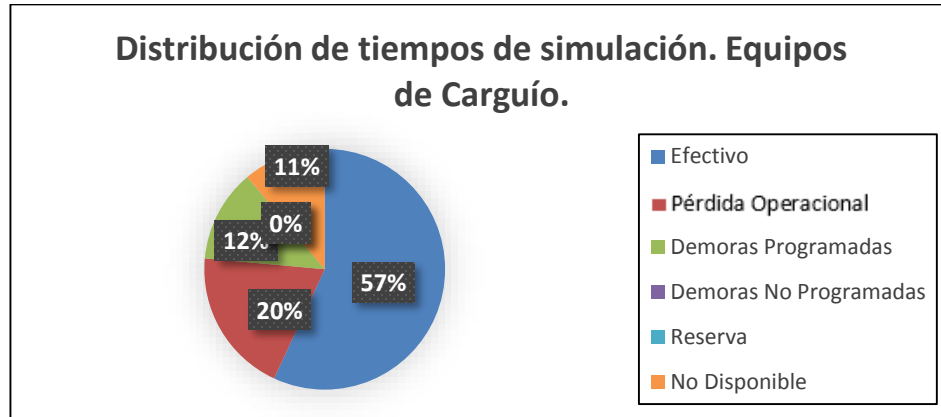


Figura 10-13: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (32 camiones)

10.2.1.3 Resultados para 30 camiones

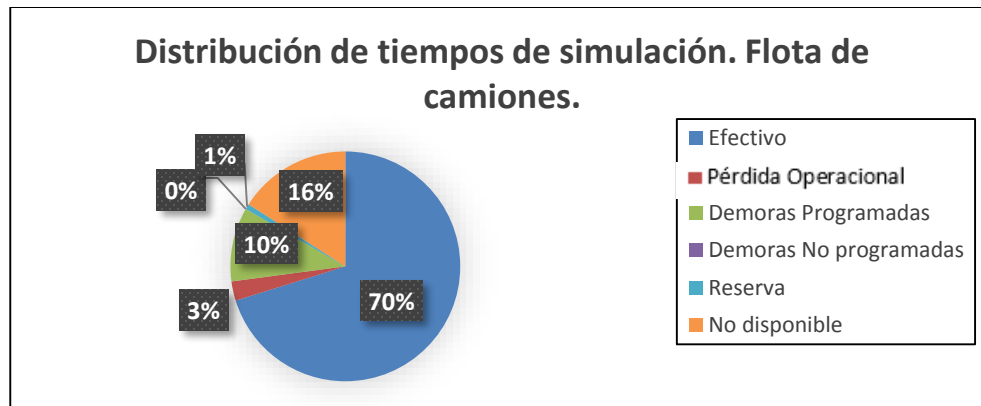


Figura 10-14: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (30 camiones).

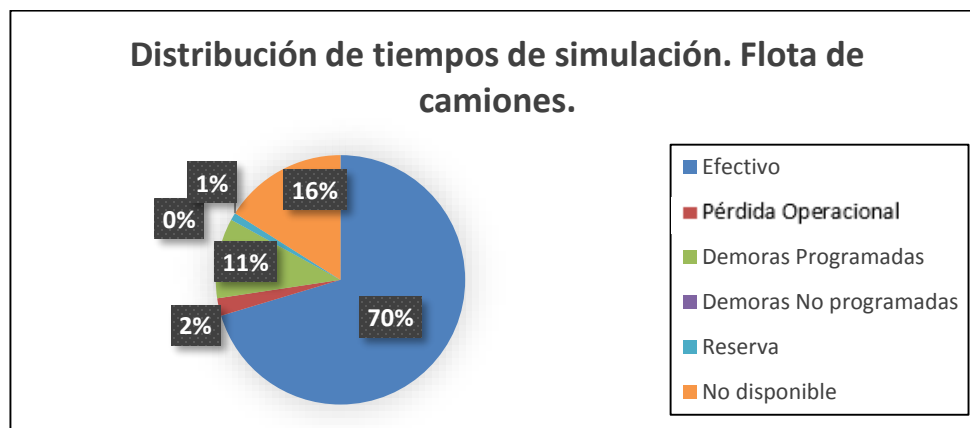


Figura 10-15: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (30 camiones).

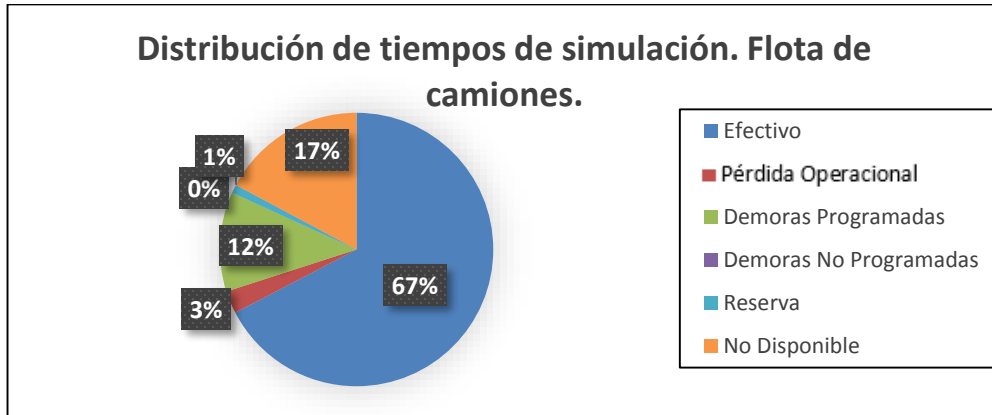


Figura 10-16: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (30 camiones).

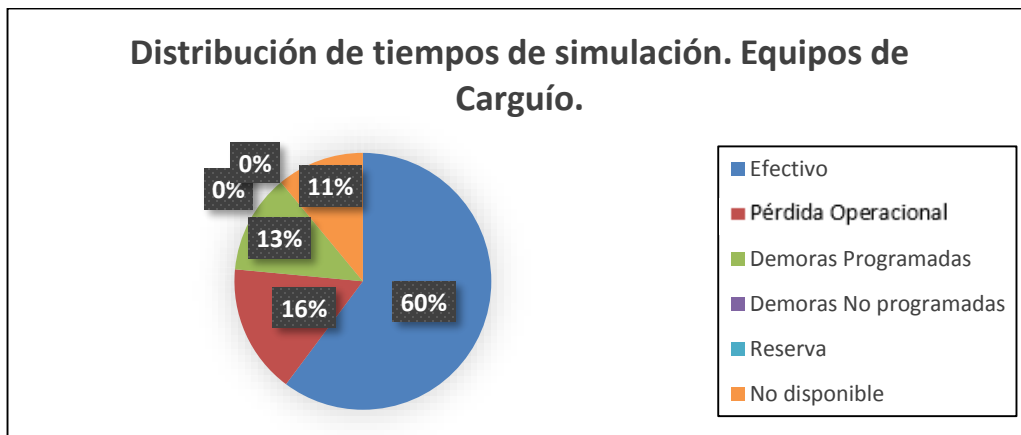


Figura 10-17: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (30 camiones)

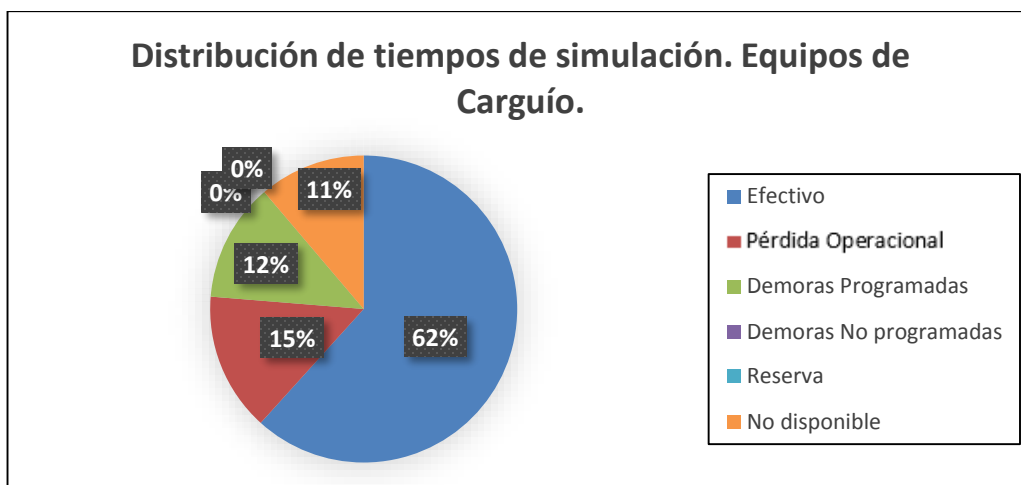


Figura 10-18: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (30 camiones)

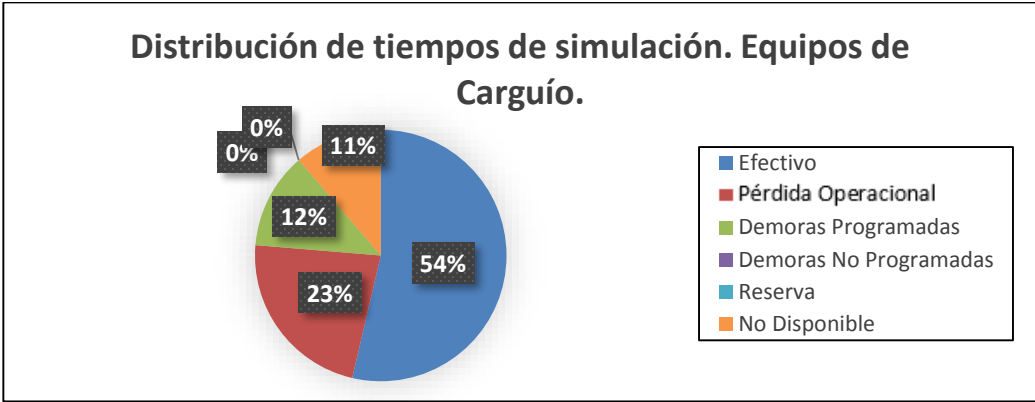


Figura 10-19: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (30 camiones)

10.2.1.4 Resultados para 25 camiones

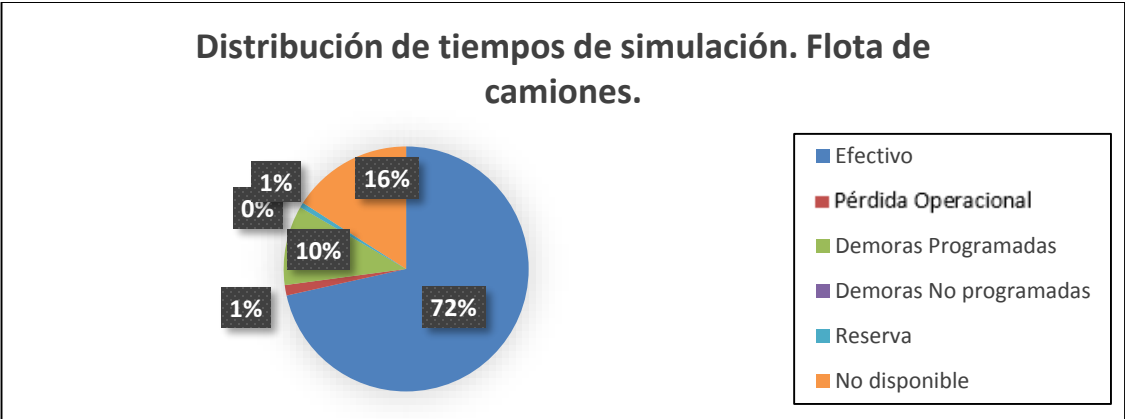


Figura 10-20: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (25 camiones).

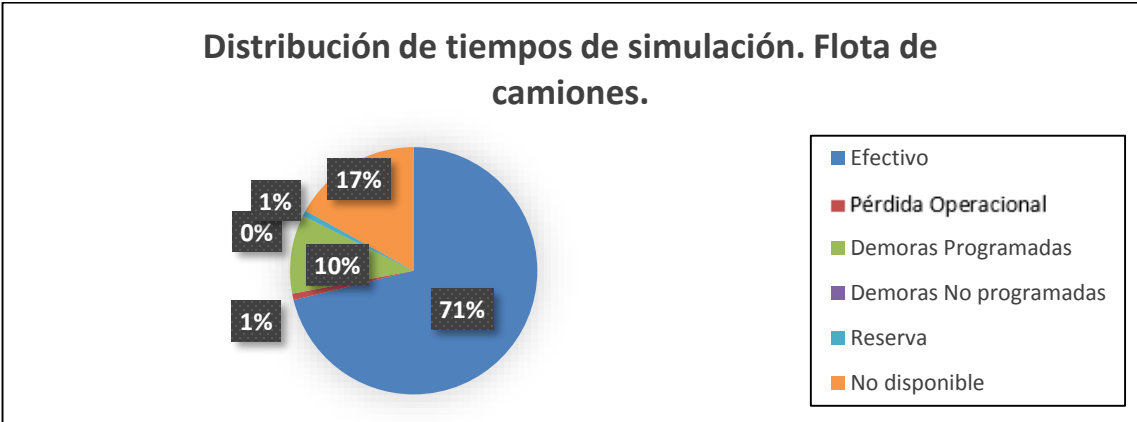


Figura 10-21: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización inicial (25 camiones).

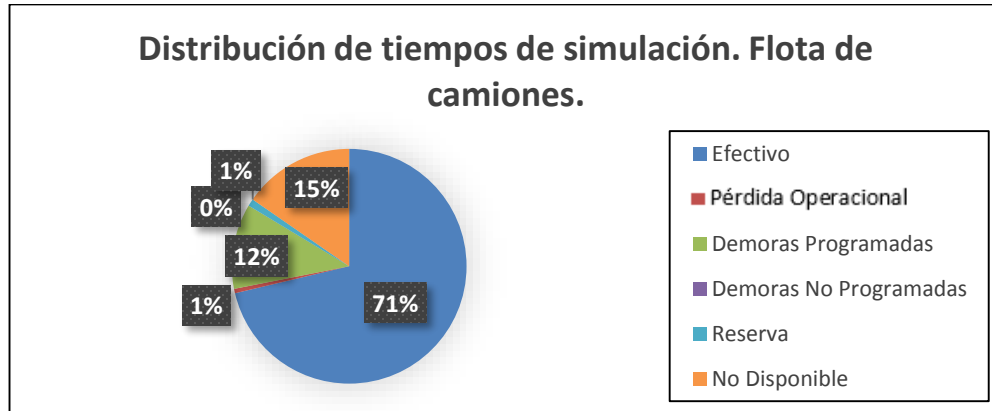


Figura 10-22: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (25 camiones).

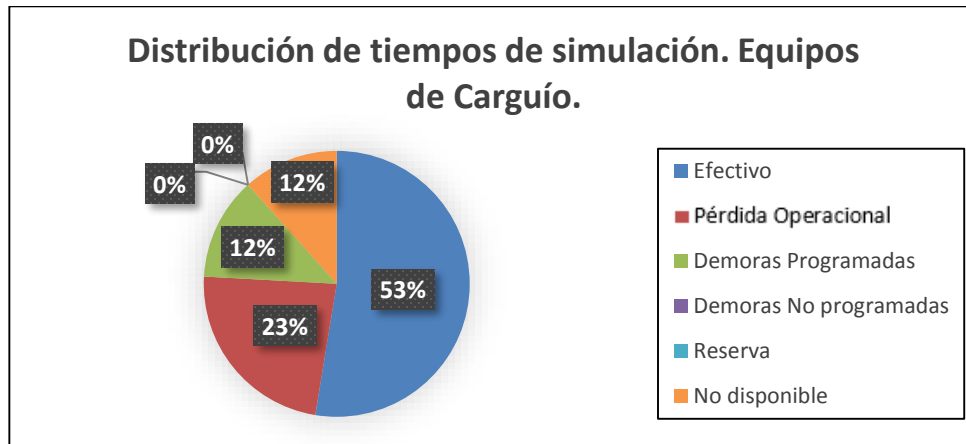


Figura 10-23: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (25 camiones)

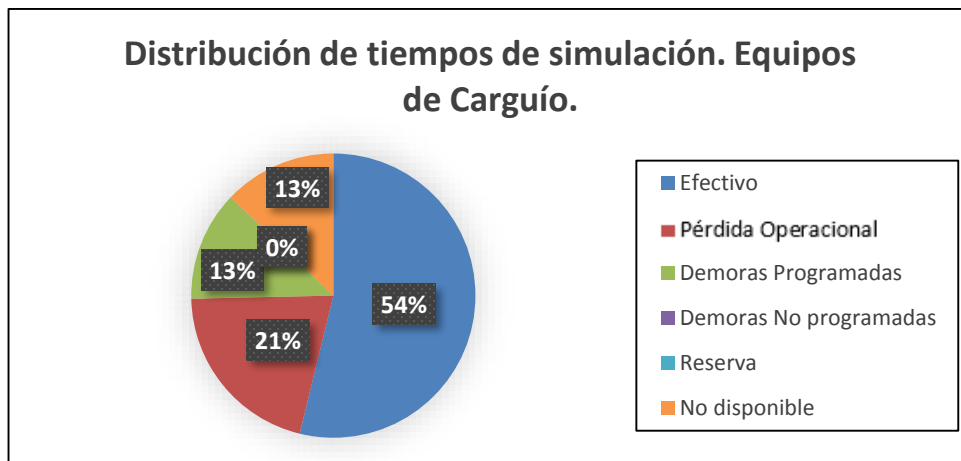


Figura 10-24: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización inicial (25 camiones)

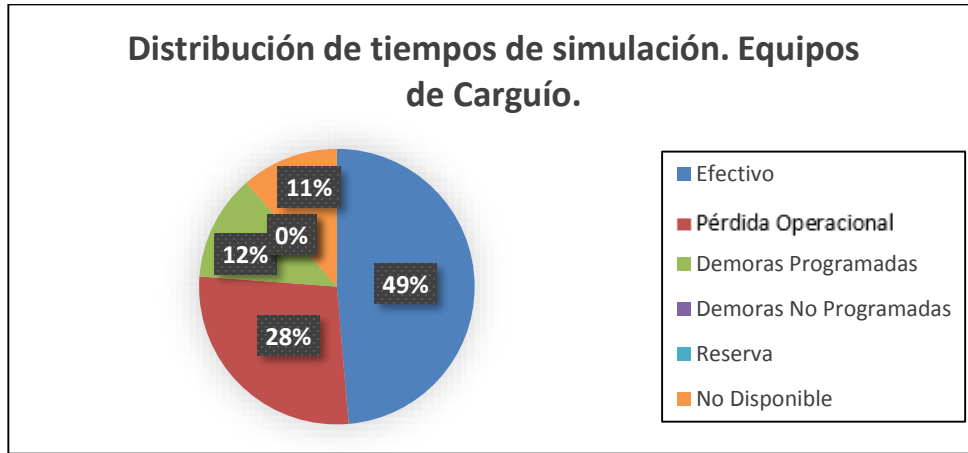


Figura 10-25: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (25 camiones)

10.2.2 Resultados de ejercicio a mediano plazo

10.2.2.1 Extracción en Botadero

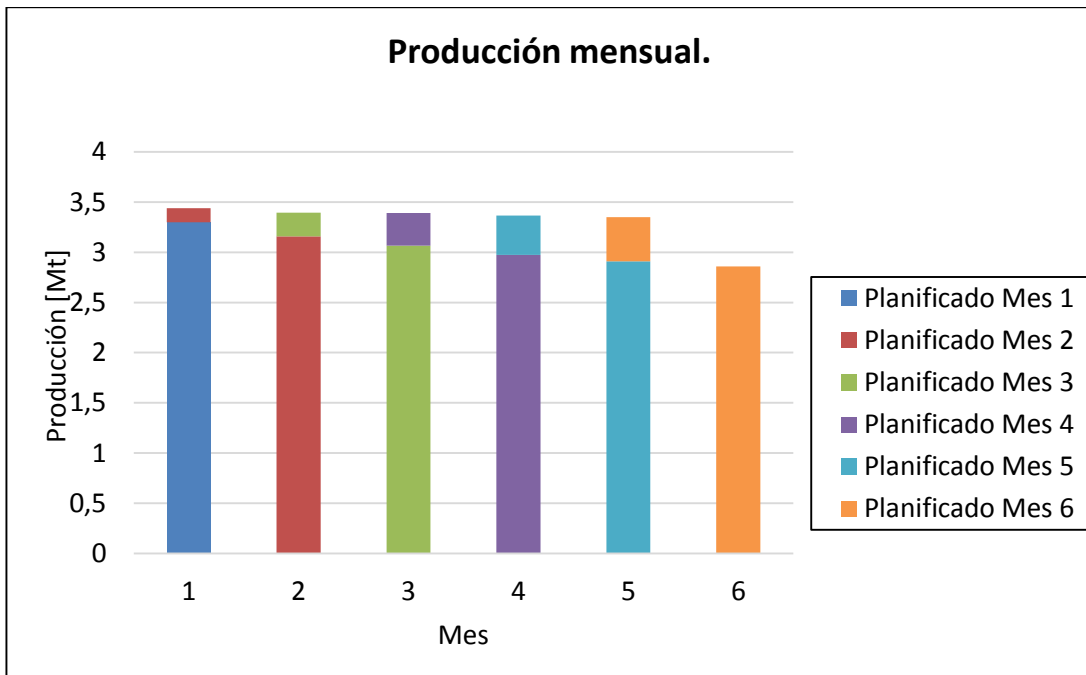


Figura 10-26: Producción mensual en botadero. Optimización continua

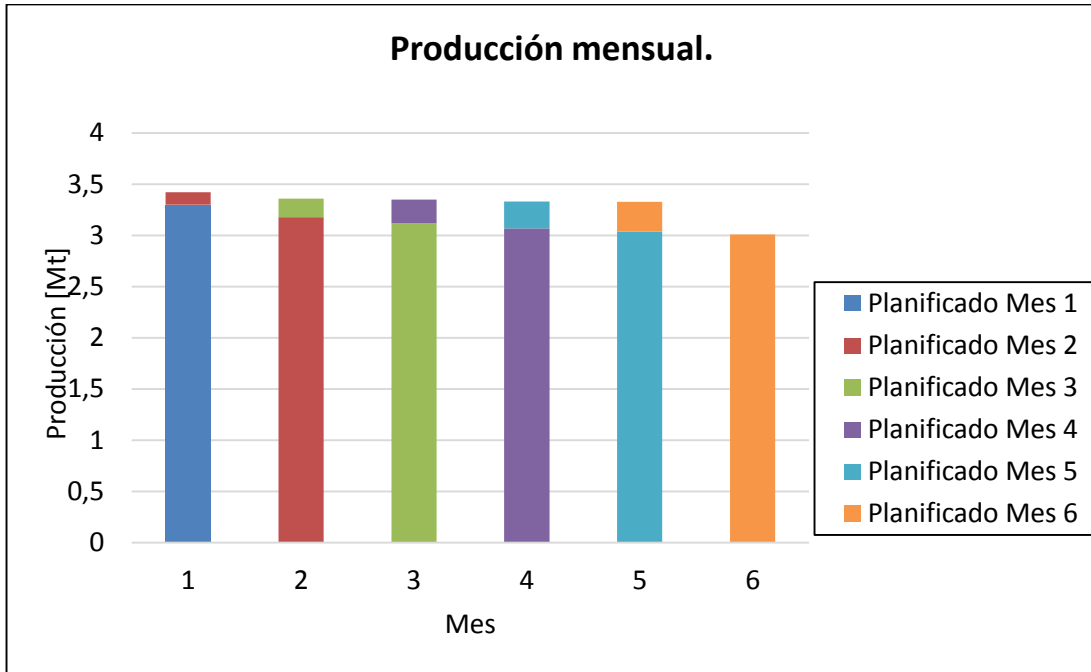


Figura 10-27: Producción mensual en botadero. Optimización inicial.

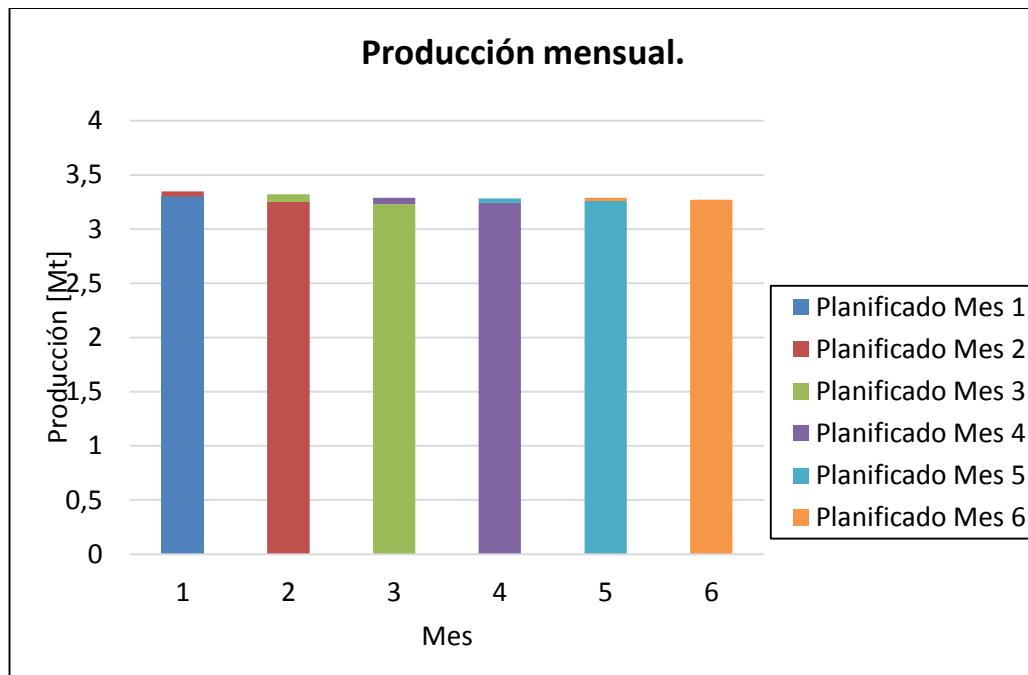


Figura 10-28: Producción mensual en botadero. Despacho priorizado.

10.2.2.2 Extracción en stock

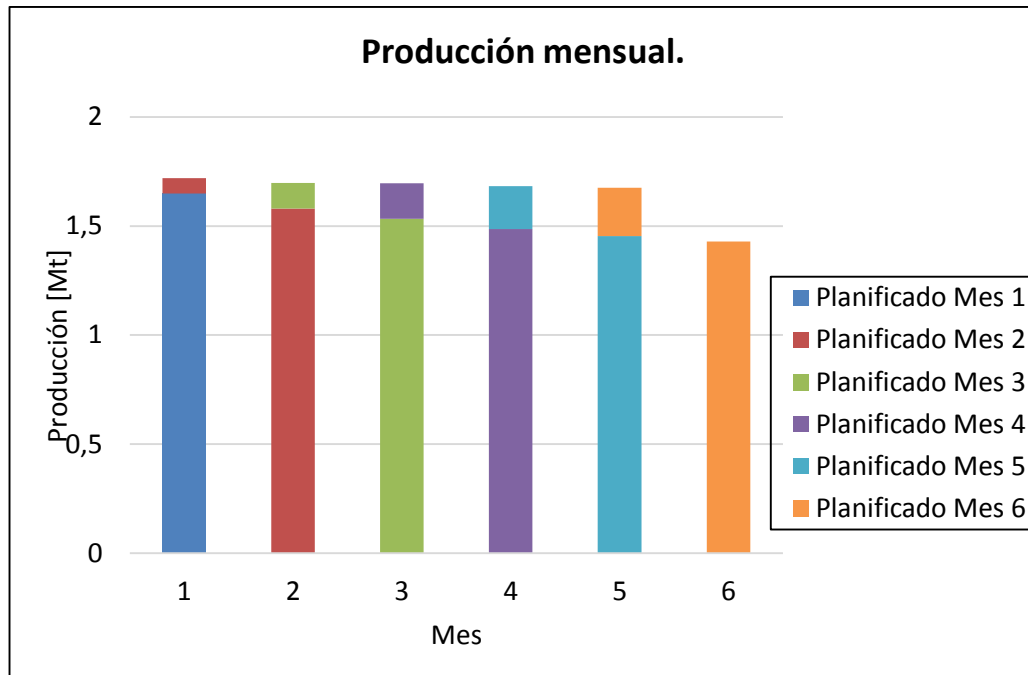


Figura 10-29: Producción mensual en stock. Optimización continua.

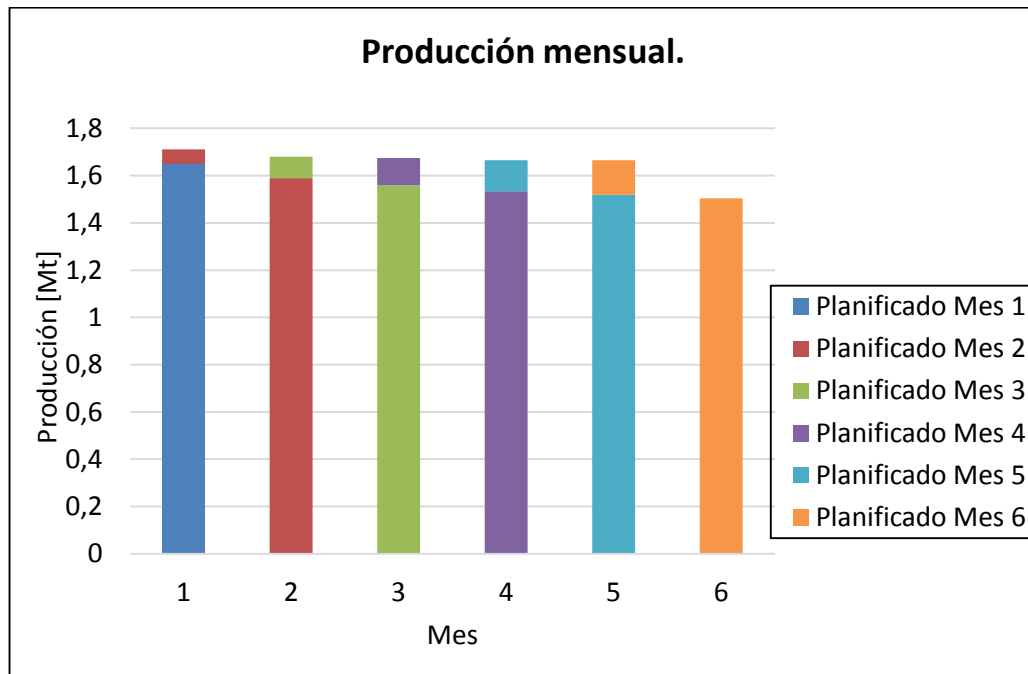


Figura 10-30: Producción mensual en stock. Optimización inicial.

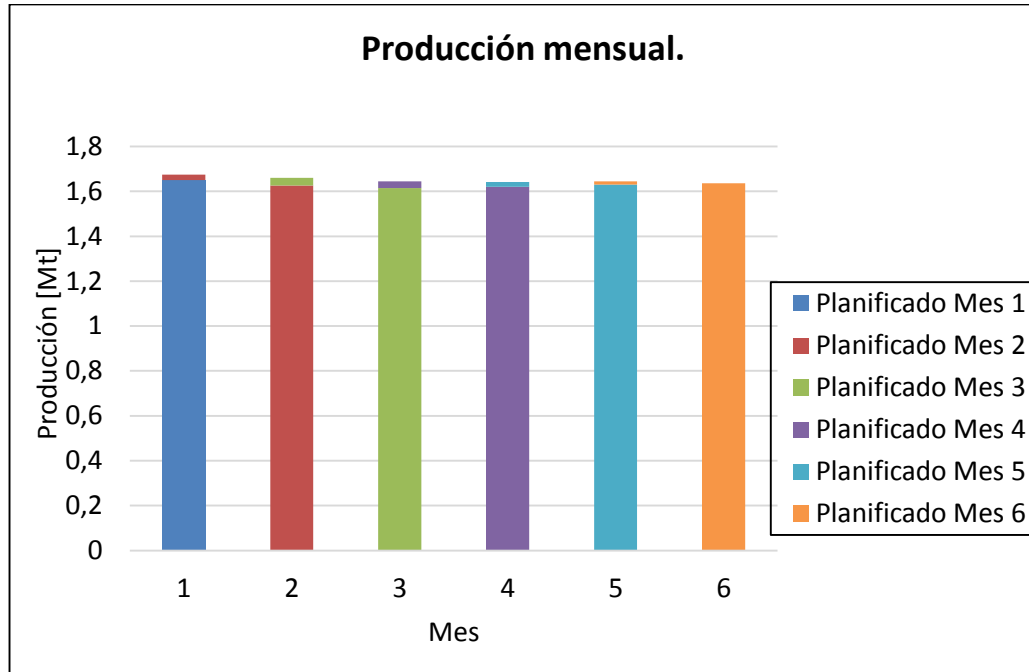


Figura 10-31: Producción mensual en stock. Despacho priorizado.

10.2.2.3 Resultados primer mes

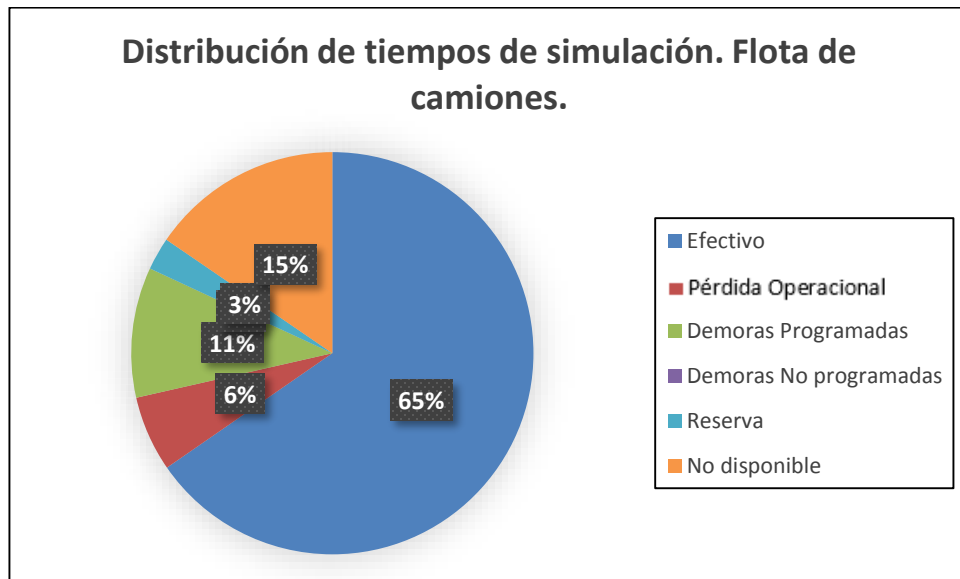


Figura 10-32: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 1).

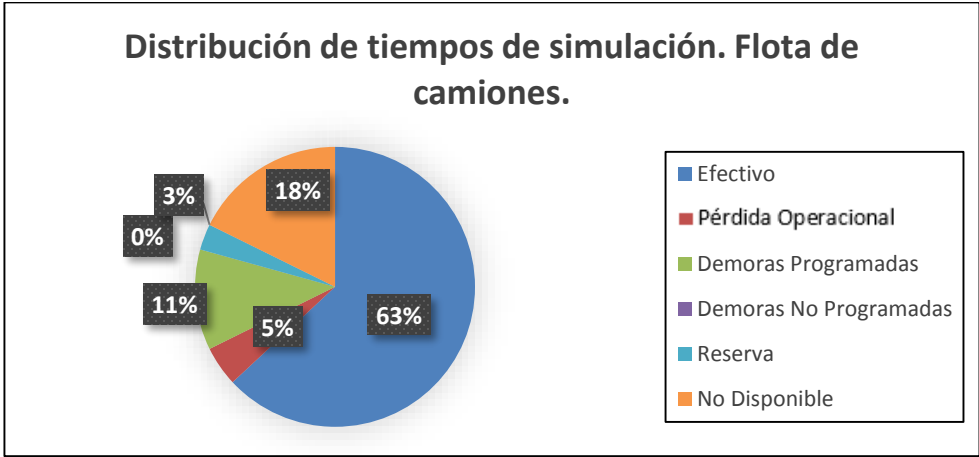


Figura 10-33: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 1).

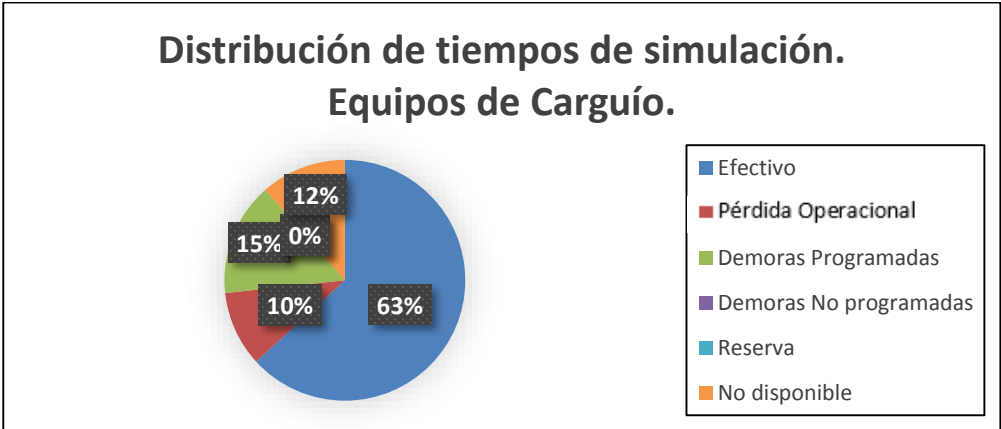


Figura 10-34: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 1).

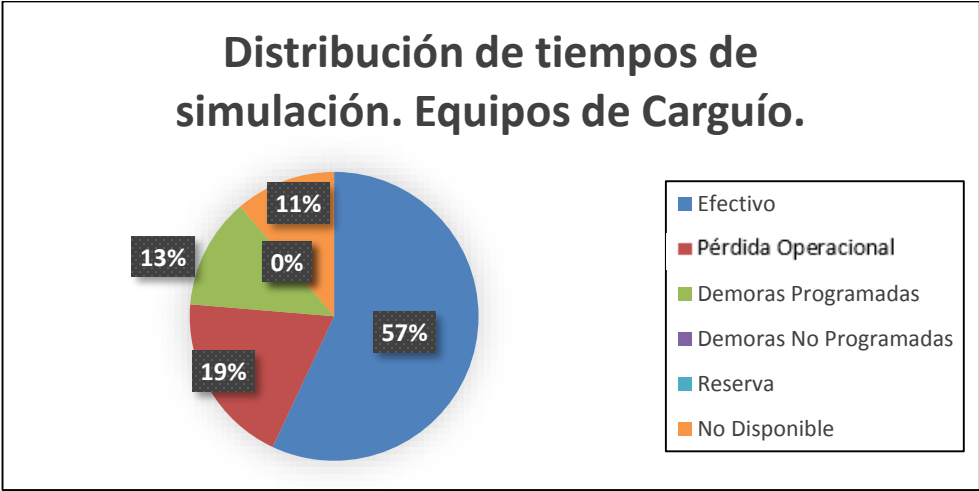


Figura 10-35: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 1).

10.2.2.4 Resultados segundo mes

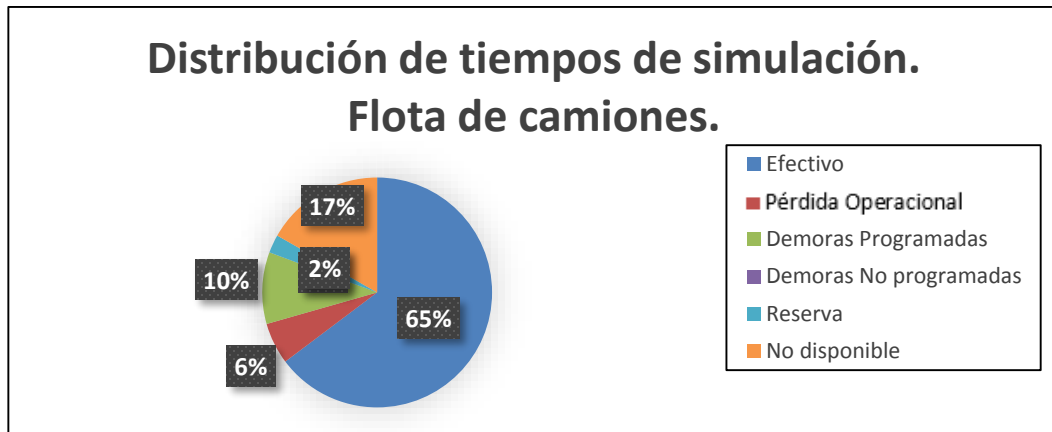


Figura 10-36: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 2).

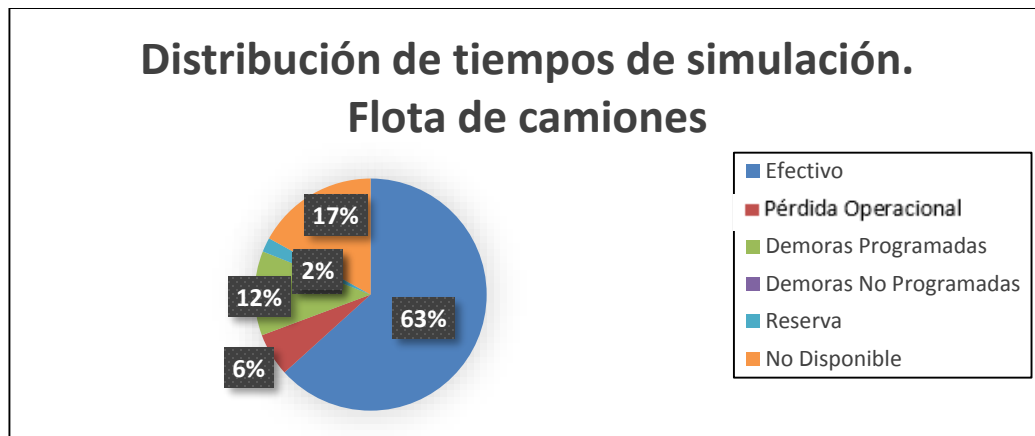


Figura 10-37: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 2).

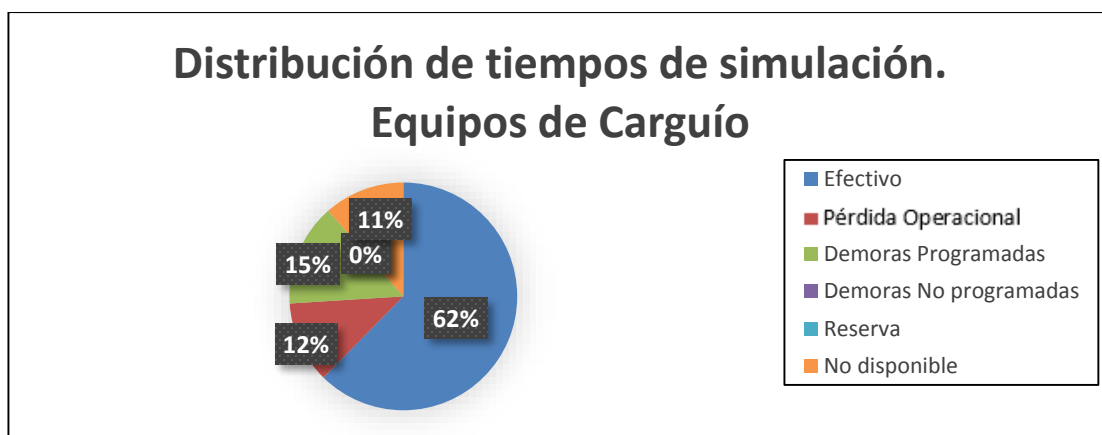


Figura 10-38: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 2).

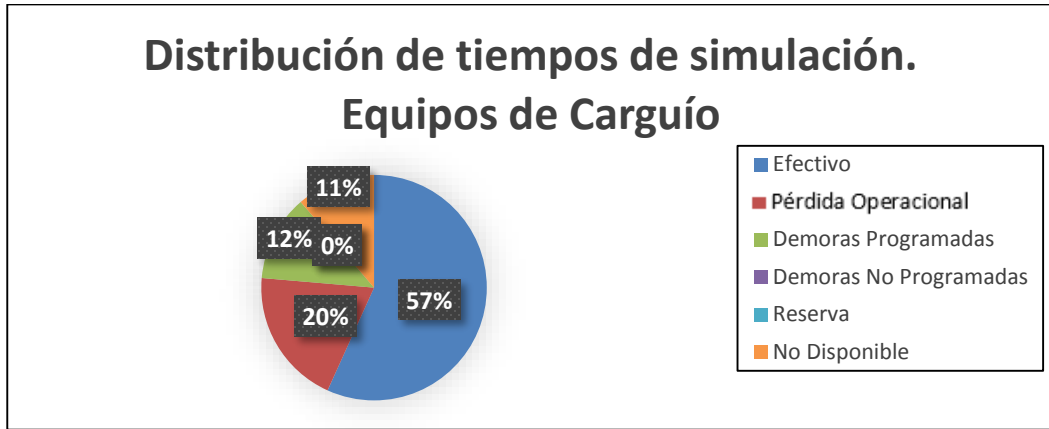


Figura 10-39: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 2).

10.2.2.5 Resultados tercer mes

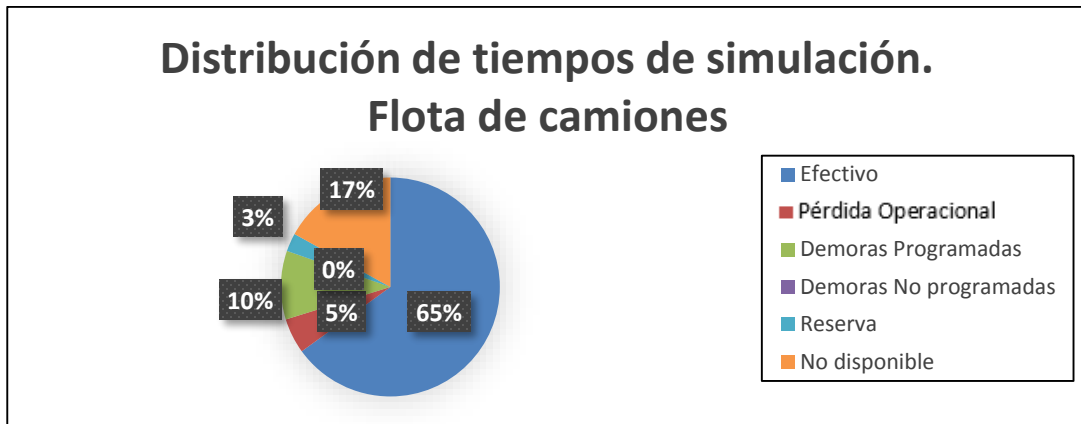


Figura 10-40: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 3).

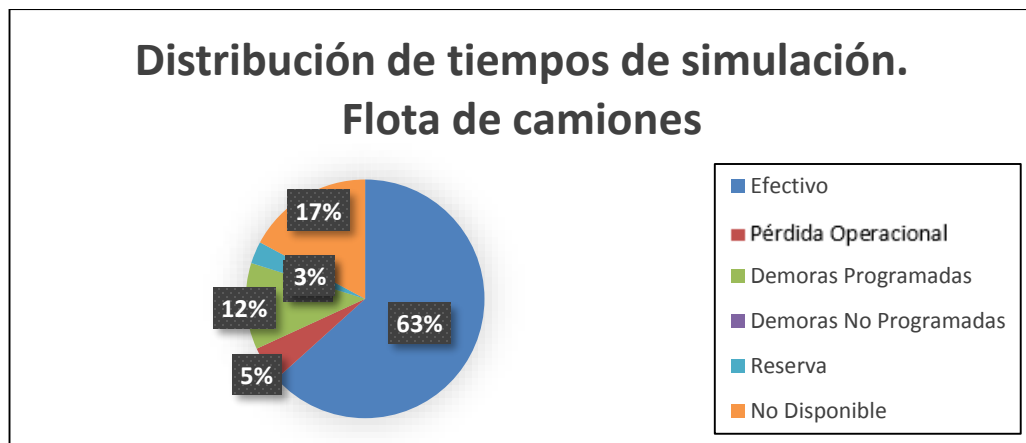


Figura 10-41: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 3).

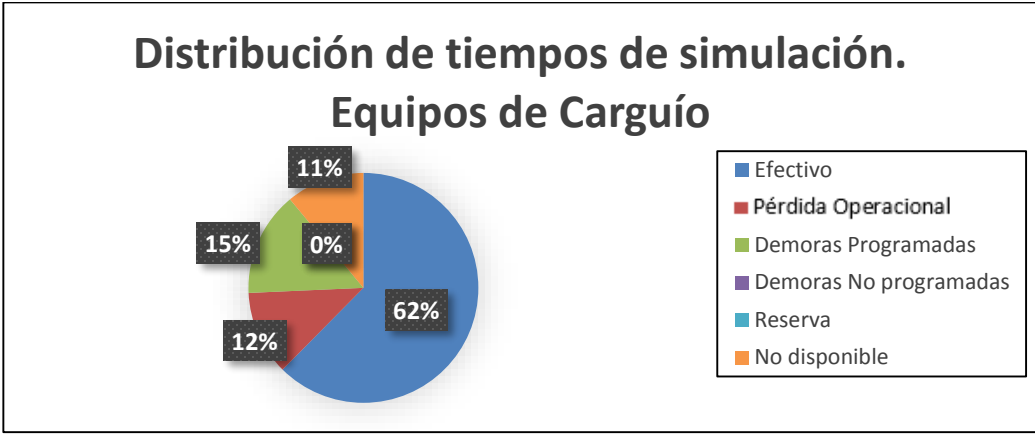


Figura 10-42: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 3).

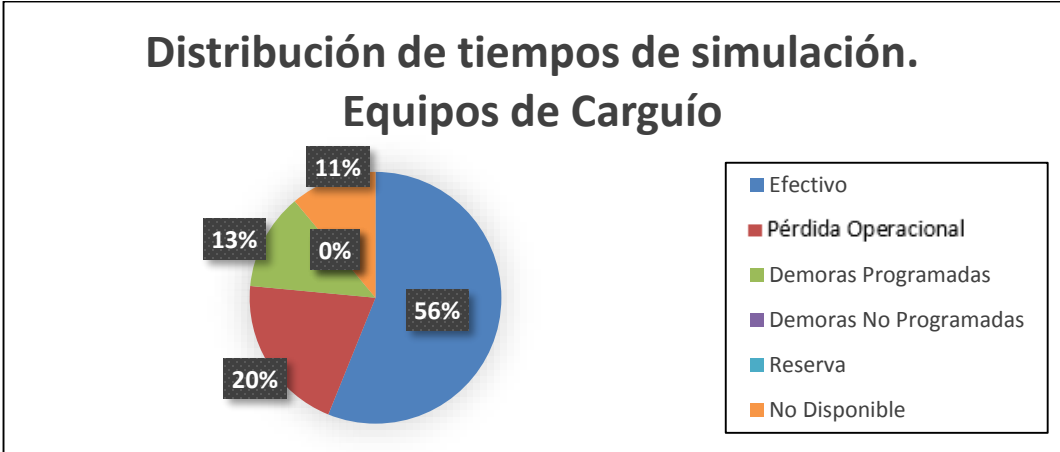


Figura 10-43: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 3).

10.2.2.6 Resultados cuarto mes

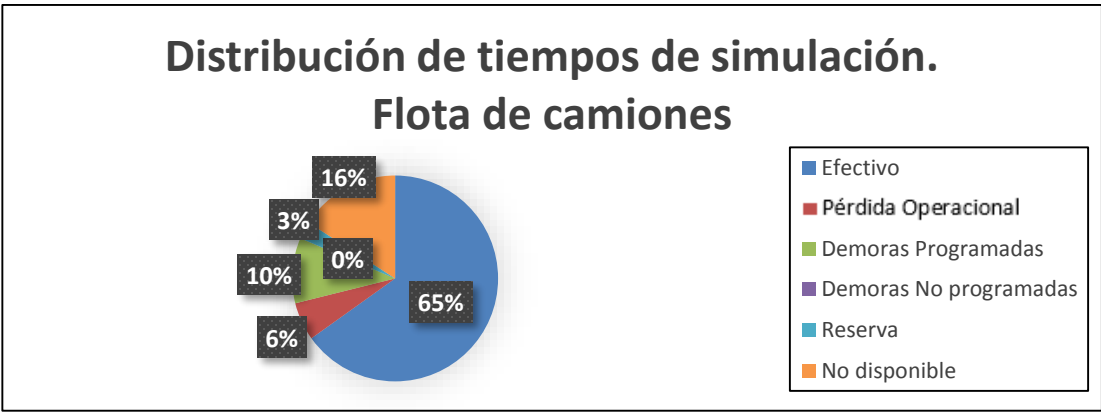


Figura 10-44: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 4).

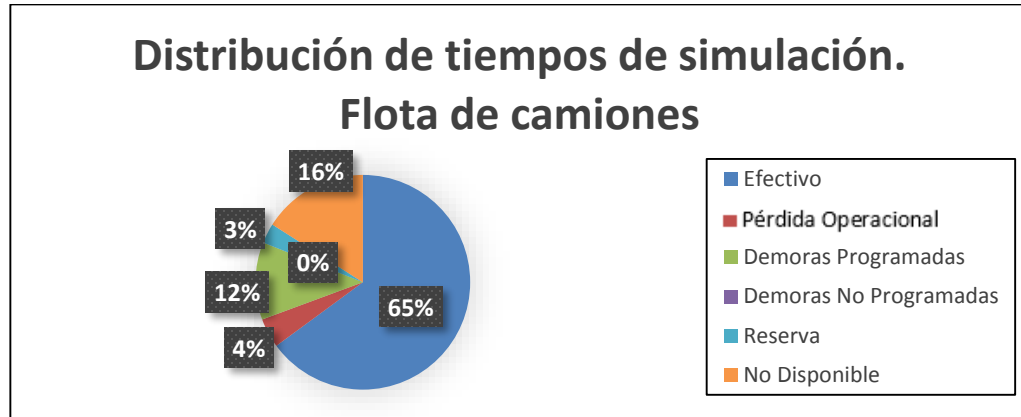


Figura 10-45: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 4).

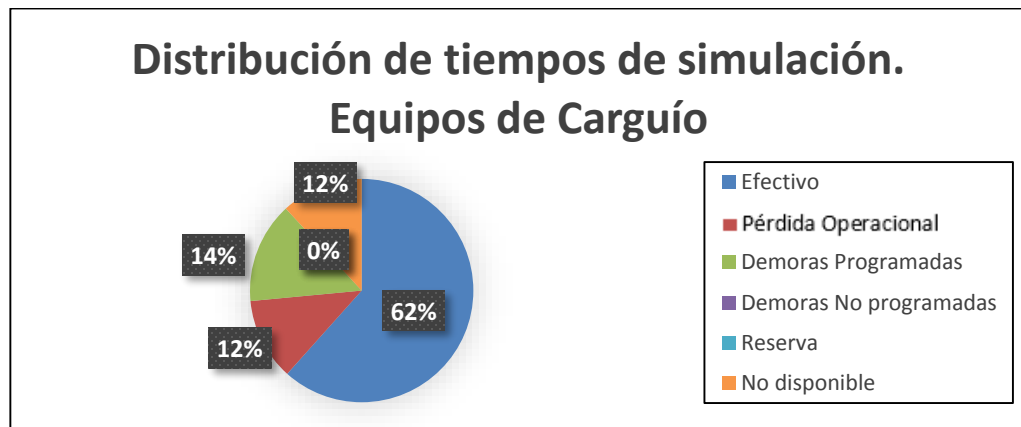


Figura 10-46: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 4).

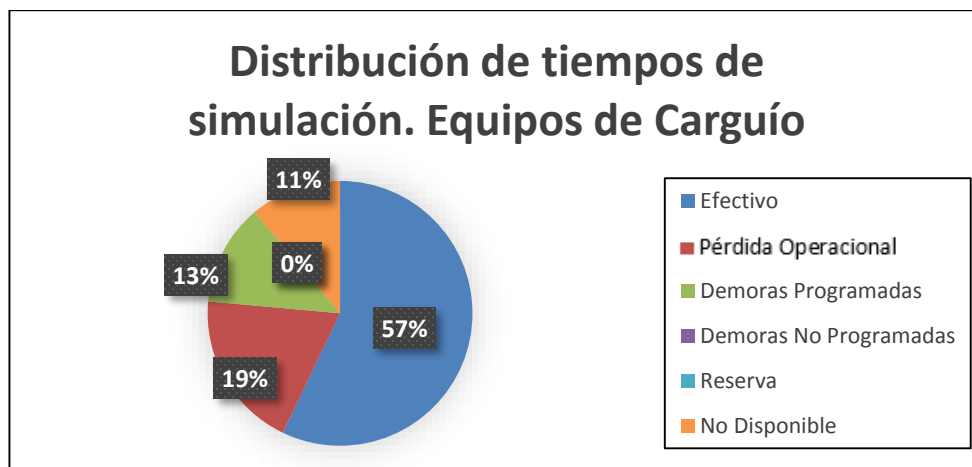


Figura 10-47: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 4).

10.2.2.7 Resultados quinto mes

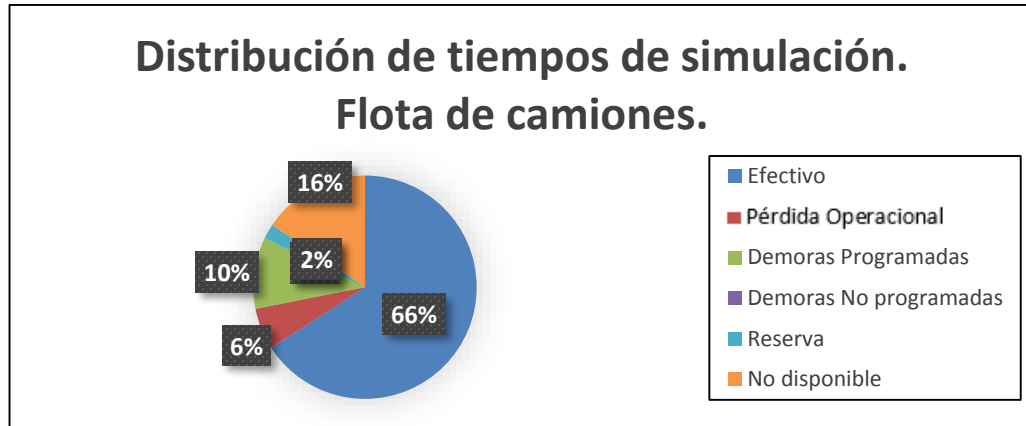


Figura 10-48: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 5).

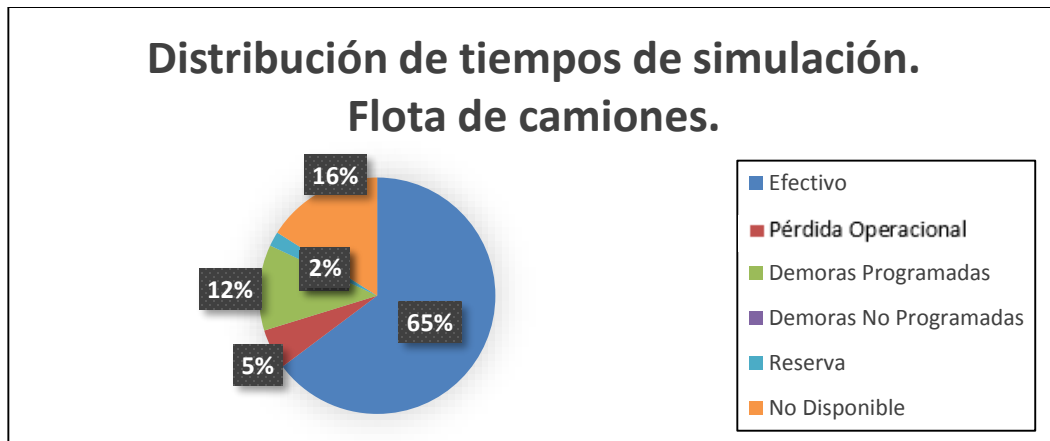


Figura 10-49: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 5).

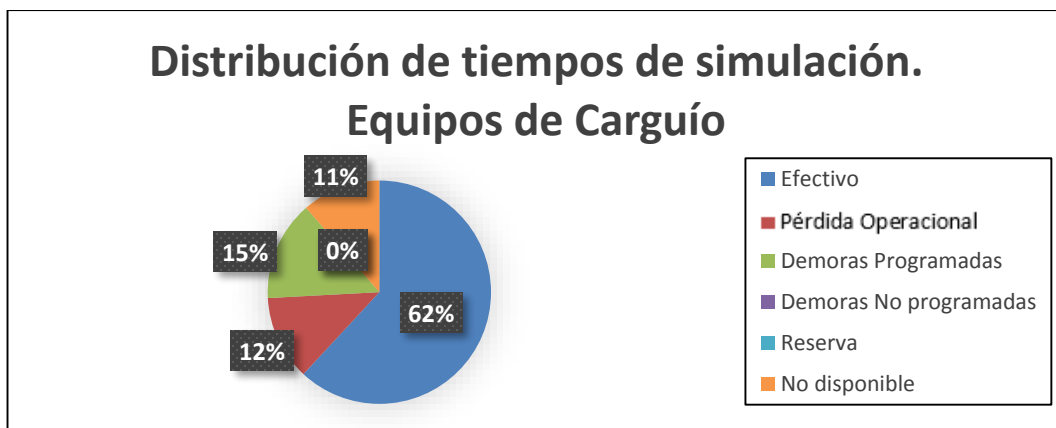


Figura 10-50: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 5).

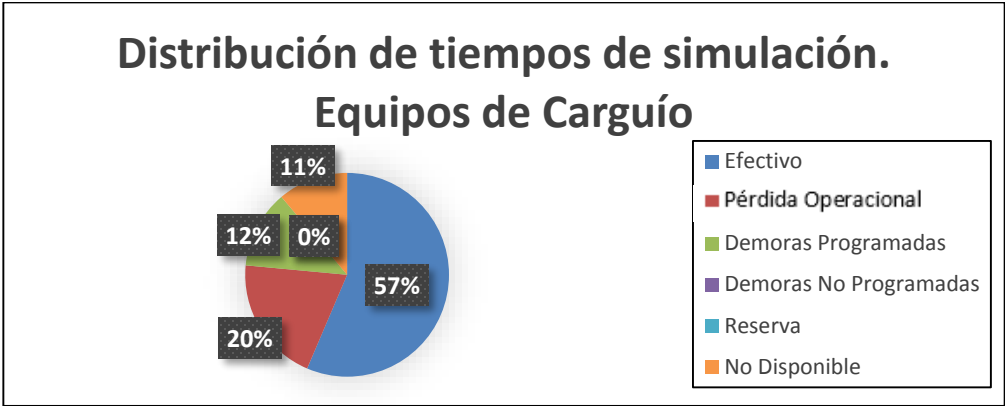


Figura 10-51: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 5).

10.2.2.8 Resultados sexto mes

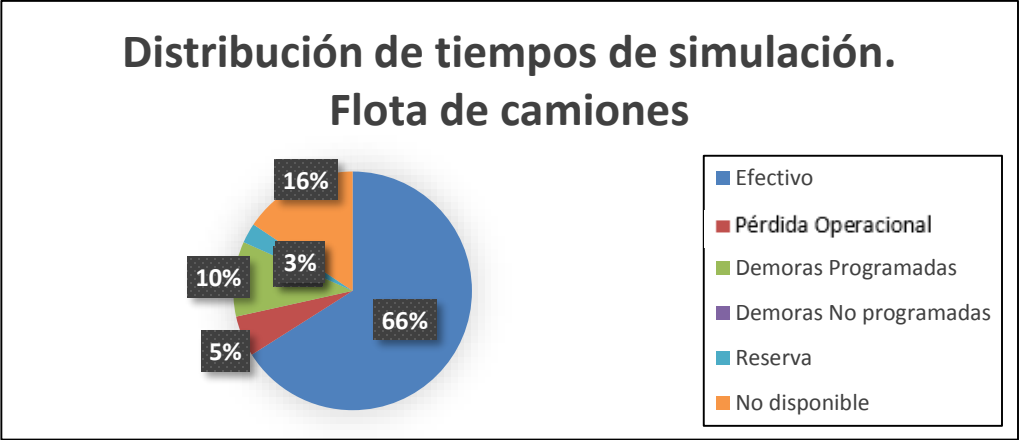


Figura 10-52: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Optimización continua (Mes 6).

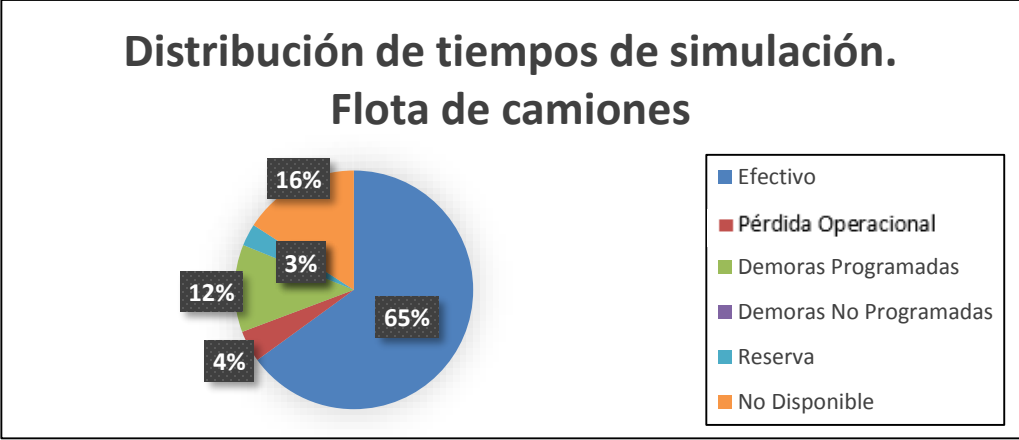


Figura 10-53: Distribución de tiempos de simulación. Flota de camiones. Despacho priorizado (Mes 6).

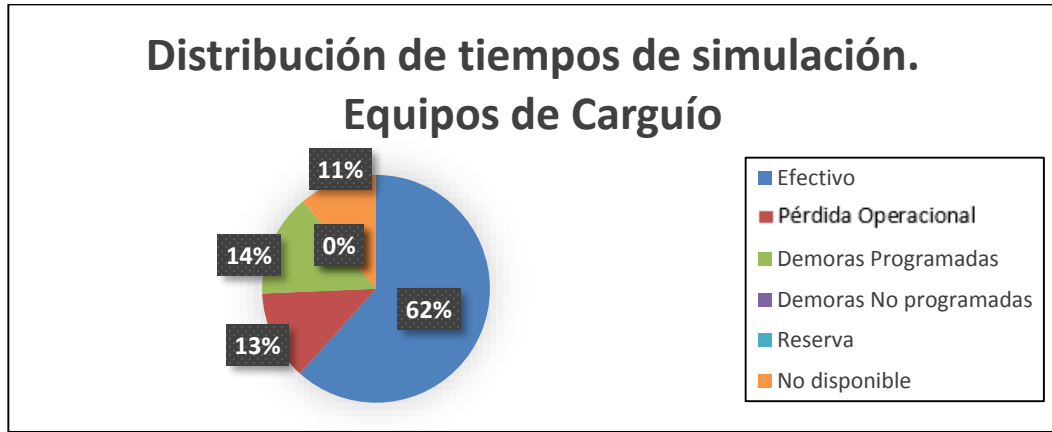


Figura 10-54: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Optimización continua (Mes 6).

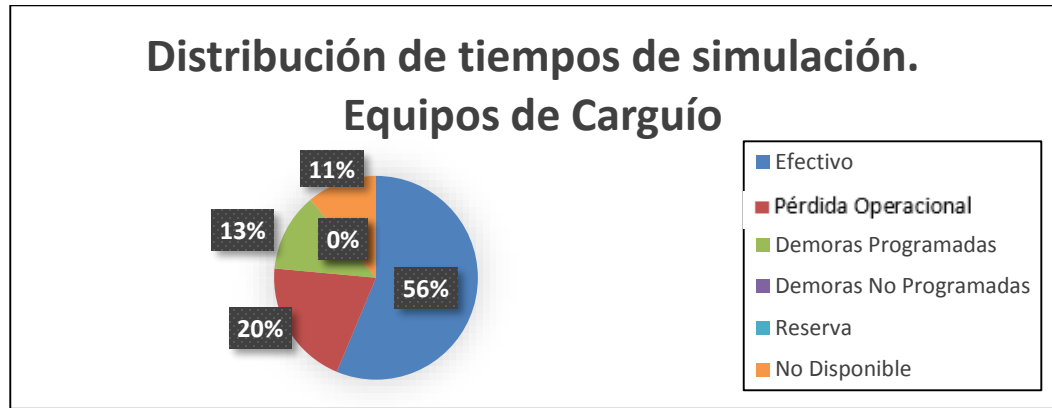


Figura 10-55: Distribución de tiempos de simulación. Equipos de carguío. Despacho priorizado (Mes 6).