

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Alcances	4
1.4. Metodología del trabajo.....	5
1.5. Estructura de la memoria	5
CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES	7
2.1. Antecedentes generales del Proyecto Chuquicamata Subterránea	7
2.1.1. Ubicación del Proyecto	11
2.1.2. Contratos mineros principales	11
2.2. Ciclo constructivo de un túnel	13
2.3. Preparación Minera.....	14
2.4. Carguío y transporte de marina en preparación minera	14
2.5. Índices Operacionales (Normativa Asarco).....	18
2.6. Rendimientos y dimensionamiento de flota de camiones	19
2.7. Pérdidas operaciones en el transporte de marina.....	21
2.8. Simulación de Procesos.....	24
2.8.1. Ventajas y desventajas de la simulación	24
2.8.2. Errores en la simulación	25
2.8.3. Simulaciones de transporte en minería subterránea	26
2.8.4. Softwares de Simulación	32
CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA DEL ESTUDIO DE SIMULACIÓN	35
3.1. Definición del problema.....	35
3.2. Recopilación de Información	38
3.3. Modelo Conceptual	39
3.3.1. Zonas determinantes.....	39
3.3.2. Límite de batería.....	40
3.3.3. Consideraciones del modelo	40
3.3.4. Parámetros de entrada	41

3.3.5.	Variables de salida	42
3.3.6.	Características de layout y rutas de transporte	43
3.3.7.	Criterios operacionales	48
3.3.8.	Flotas de equipos y velocidades.....	62
3.4.	Modelo Computacional	64
3.4.1.	Cantidad de corridas necesarias	65
3.5.	Verificación del modelo	66
3.6.	Validación y Calibración del modelo	67
3.6.1.	Horarios de operación y detención	67
3.6.2.	Zonas determinantes.....	68
3.6.3.	Rutas de transporte	68
3.6.4.	Flotas de equipos	70
3.6.5.	Tonelajes de marina movidos a botadero.....	70
3.6.6.	Tiempos de ciclo.....	71
3.7.	Definición de escenarios y Análisis de sensibilidad	72
3.8.	Documentación	73
CAPÍTULO 4 : RESULTADOS.....		74
4.1.	Modelo de Validación.....	74
4.1.1.	Test de Hipótesis.....	77
4.2.	Modelos Predictivos	80
4.2.1.	Cantidad de Corridas.....	80
4.2.2.	Caso Sin ensanches en Rampa Exploraciones (Caso Base).....	81
4.2.3.	Caso con 1 Ensanche en Rampa Exploraciones.....	83
4.2.4.	Caso con 2 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	85
4.2.5.	Caso con 3 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	87
4.2.6.	Caso con 4 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	89
4.2.7.	Caso con 5 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	91
4.2.8.	Caso con 6 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	93
4.2.9.	Caso con 7 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	95
4.2.10.	Caso sin ensanches con espera de camiones cargados.....	97
4.2.11.	Sensibilidad de mejor escenario.....	99
CAPÍTULO 5 : ANÁLISIS DE RESULTADOS		101
5.1.	Análisis de validación.....	101
5.2.	Análisis de modelo predictivo.....	103

5.2.1. Análisis de caso base	103
5.2.2. Análisis de incorporar ensanches a la Rampa Exploraciones	103
5.2.3. Análisis de pérdidas operacionales	106
5.2.4. Análisis de Sensibilidad	107
5.2.5. Opciones tras sensibilidad.....	109
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
6.1. Conclusiones.....	111
6.2. Recomendaciones	112
CAPÍTULO 7 : BIBLIOGRAFÍA.....	114
CAPÍTULO 8 : ANEXOS.....	117
8.1. ANEXO A	117
8.2. ANEXO B	119
8.3. ANEXO C	127
8.4. ANEXO D	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Botaderos actuales de marina y áreas alternativas - Fondo Mina Chuquicamata.....	2
Figura 2: Disposición de los Niveles de Explotación Minera - Proyecto Chuquicamata Subterránea	8
Figura 3: Sistema de Manejo de Minerales (Subterráneo y de Superficie) – PMCHS.....	8
Figura 4: Sistema de Ventilación Inyección Principal – PMCHS.....	9
Figura 5: Sistema de Ventilación Extracción Principal – PMCHS.....	10
Figura 6: Ubicación del Proyecto – PMCHS.....	11
Figura 7: Alcance de los contratos principales de interior mina – PMCHS.....	12
Figura 8: Disposición general de Subniveles – PMCHS.....	12
Figura 9: Distribución porcentual de tiempos de ciclo.....	13
Figura 10: Estrategias de carguío de marina.....	15
Figura 11: Opciones de traspaso a camiones. Izquierda: Traspaso horizontal (lhd-camión). Derecha: Traspaso por buzón.....	16
Figura 12: Representación de ciclo de transporte de marina larga.....	17
Figura 13: Clasificaciones de tiempos.....	18
Figura 14: Pérdidas operacionales en el transporte de marina por camiones.....	21
Figura 15: Representación de cola en punto de carguío.....	22
Figura 16: Representación de espera en ensanche vial.....	23
Figura 17: Representación de espera en cruce.....	23
Figura 18: Toneladas de mineral promedio transportadas por turno - Carga por LHD y buzón (Runciman et al, 1997).....	27
Figura 19: Proporción de tiempo según estado de flota en Bloque A - Producción (Hall, 2000).....	28
Figura 20: Layout de mina de sublevel stoping (Salama & Greberg, 2012).....	29
Figura 21: Situaciones que no deben ocurrir en rutas de transporte (Fioroni et al, 2013).....	30
Figura 22: Etapas de la metodología propuesta.....	35
Figura 23: Fase 42 del Rajo Chuquicamata en marzo y septiembre de 2017.....	36
Figura 24: Rampas de salida al Rajo Chuquicamata y ensanches en Rampa Exploraciones propuestos.....	37
Figura 25: Layout de transporte de marinas PMCHS.....	43
Figura 26: Layout de transporte de marinas con elementos de tránsito y rutas de transporte PMCHS.....	47
Figura 27: Tiempo total de pérdidas operacionales programadas.....	49
Figura 28: Representación de estado de los tramos en layout de ejemplo.....	50
Figura 29: Excepciones de espera de un camión cargado.....	51
Figura 30: Ejemplo de semaforización.....	53
Figura 31: Lógica de semaforización (Semáforo 2).....	54
Figura 32: Sistema de despacho en layout ejemplo.....	55
Figura 33: Representación de algoritmo de despacho del ejemplo.....	56
Figura 34: Punto de carguío con loop de camiones.....	57

Figura 35: Punto de carguío sin loop de camiones – Espera en ensanche.....	57
Figura 36: Punto de carguío sin loop de camiones - Espera en estocada.	57
Figura 37: Diagrama de decisión según tipo de punto de carguío.	58
Figura 38: Ejemplo de punto de descarga.....	59
Figura 39: Diagrama de decisión en botadero.	59
Figura 40: Diagrama de decisión previo a colación o cambio de turno.	60
Figura 41: Diagrama de decisión para carguío de combustible.....	61
Figura 42: Enrutamiento de las entidades en las locaciones del modelo.	65
Figura 43: Rutas de transporte para caso de validación.	69
Figura 44: Ubicación de ensanches en estudio (Rampa Exploraciones y Estocada 29).....	73
Figura 45: Ubicación ensanche para Caso: 1 Ensanche en Rampa Exploraciones.....	83
Figura 46: Ubicación ensanches para Caso: 2 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	85
Figura 47: Ubicación ensanches para Caso: 3 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	87
Figura 48: Ubicación ensanches para Caso: 4 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	89
Figura 49: Ubicación ensanches para Caso: 5 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	91
Figura 50: Ubicación ensanches para Caso: 6 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	93
Figura 51: Ubicación ensanches para Caso: 7 Ensanches en Rampa Exploraciones.....	95
Figura 52: Zona de espera de camiones cargados.	97
Figura 53: Tramos del layout de transporte del PMCHS.....	128
Figura 54: Área del banco 2147 del Rajo Chuquicamata.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de la Preparación Minera (Camhi, 2012).....	14
Tabla 2: Comparación de principales softwares de simulación.....	33
Tabla 3: Parámetros de entrada estocásticos.....	41
Tabla 4: Parámetros de entrada determinísticos.....	42
Tabla 5: Variables de salida del modelo.....	42
Tabla 6: Características de los tramos de layout marinas PMCHS.....	44
Tabla 7: Nombre de zonas determinantes.....	45
Tabla 8: Rutas de transporte de marina en layout.....	46
Tabla 9: Actividades en Pérdidas Operacionales Programadas.....	48
Tabla 10: Horarios de Pérdidas Operacionales Programadas.....	49
Tabla 11: Flota de camiones del C010.....	62
Tabla 12: Flota de camiones del C013A.....	62
Tabla 13: Velocidades de camiones cargados en función de la pendiente (Km/h)..	63

Tabla 14: Componentes de los elementos del modelo en Promodel.	64
Tabla 15: Horarios de operación y detención para caso de validación.	67
Tabla 16: Ubicación de zonas determinantes para caso de validación.	68
Tabla 17: Flota de equipos caso validación.	70
Tabla 18: Errores absolutos y relativos del modelo de validación.	77
Tabla 19: Resumen de información para test de hipótesis.	78
Tabla 20: Resultados Pruebas t-student para diferencia de medias ($\alpha = 0.01$).	79
Tabla 21: Corridas de caso base	80
Tabla 22: Resultados para determinar el número de corridas.	80
Tabla 23: Desglose de Tiempo operacional (Caso Base).	82
Tabla 24: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 1 Ensanche).	84
Tabla 25: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 2 Ensanches).	86
Tabla 26: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 3 Ensanches).	88
Tabla 27: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 4 Ensanches).	90
Tabla 28: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 5 Ensanches).	92
Tabla 29: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 6 Ensanches).	94
Tabla 30: Desglose de Tiempo operacional (Caso: 7 Ensanches).	96
Tabla 31: Desglose de Tiempo operacional (Caso: Sin ensanches con espera)	98
Tabla 32: Velocidad de subida ponderada según distancia recorrida (Km/h).	101
Tabla 33: Casos opcionales tras sensibilidad	109
Tabla 34: Propuesta de flota de camiones según plan de marinas de Sep-17 a Mar-18 (Tonelajes por turno).	110
Tabla 35: Parámetros de distribución de tiempo de carguío camión 60 ton.	119
Tabla 36: Pruebas para distribución de tiempo de carguío camión 60 ton.	119
Tabla 37: Parámetros de tiempo de carguío camión 30 ton.	120
Tabla 38: Pruebas para tiempo de carguío de camión 30 ton.	120
Tabla 39: Parámetros de tiempo de carguío camión 20 ton.	121
Tabla 40: Pruebas para tiempo de carguío camión 20 ton.	121
Tabla 41: Parámetros de tiempo de descarga.	122
Tabla 42: Pruebas para tiempo de descarga.	122
Tabla 43: Parámetros de tiempo de maniobra de carguío.	123
Tabla 44: Pruebas para tiempo de maniobra de carguío.	123
Tabla 45: Parámetros de tiempo de maniobra de descarga.	124
Tabla 46: Pruebas para tiempo de maniobra de descarga.	124
Tabla 47: Parámetros de factor de carga C010.	125
Tabla 48: Pruebas para factor de carga C010.	125
Tabla 49: Parámetros de factor de carga C013A.	126
Tabla 50: Pruebas para factor de carga C013A.	126
Tabla 51: Desglose de Tiempo Operacional según flota de camiones	127

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Plan de extracción de marinas mensual y por turno desde septiembre-17 a marzo-18 (Base húmeda y sobre excavación).....	38
Gráfico 2: Movimiento total de Marina C010 (período de validación).....	70
Gráfico 3: Movimiento total de Marina C013A (período de validación).	71
Gráfico 4: Frecuencia relativa de tiempos de ciclo del C010 (medidos).....	71
Gráfico 5: Frecuencia relativa de tiempos de ciclo del C013A (medidos).	72
Gráfico 6: Frecuencia relativa y media de tiempos de ciclo del C010 (Simulación y medido).....	75
Gráfico 7: Frecuencia relativa y media de tiempos de ciclo del C013A (Simulación y medido).	75
Gráfico 8: Tonelajes de marina del modelo de validación C010. Media de la simulación y media de los datos medidos.....	76
Gráfico 9: Tonelajes de marina del modelo de validación C013A. Media de la simulación y media de los datos medidos.....	76
Gráfico 10: Test de Hipótesis t-student Tonelajes C010.	78
Gráfico 11: Test de Hipótesis t-student Tonelajes C013A.....	78
Gráfico 12: Test de Hipótesis t-student Tiempos de ciclo C010.....	79
Gráfico 13: Test de Hipótesis t-student Tiempos de ciclo C013A.	79
Gráfico 14: Movimiento de marina y Tiempos de Ciclo (Caso Base).	81
Gráfico 15: Distribución del Tiempo Operacional (Caso Base).	82
Gráfico 16: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 1 Ensanche).....	83
Gráfico 17: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 1 Ensanche).	84
Gráfico 18: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 2 Ensanches).....	85
Gráfico 19: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 2 Ensanches).....	86
Gráfico 20: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 3 Ensanches).....	87
Gráfico 21: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 3 Ensanches).....	88
Gráfico 22: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 4 Ensanches).....	89
Gráfico 23: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 4 Ensanches).....	90
Gráfico 24: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 5 Ensanches).....	91
Gráfico 25: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 5 Ensanches).....	92
Gráfico 26: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 6 Ensanches).....	93
Gráfico 27: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 6 Ensanches).....	94
Gráfico 28: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo (Caso: 7 Ensanches).....	95
Gráfico 29: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: 7 Ensanches).....	96
Gráfico 30: Movimiento de Marina y Tiempos de Ciclo Caso: Sin ensanches con espera).....	97
Gráfico 31: Distribución del Tiempo Operacional (Caso: Sin Ensanches con espera).....	98
Gráfico 32: Movimiento de Marina sensibilizando el número de camiones.	99
Gráfico 33: Movimiento de Marina sensibilizando el Factor de Carga del C013A.....	100

Gráfico 34: Movimiento de Marina sensibilizando el máximo número de camiones a botadero para flota de 20 camiones.	100
Gráfico 35: Comparación de casos en movimiento de marina y tiempos de ciclo.....	104
Gráfico 36: Comparación de casos en la distribución del Tiempo Operacional	105
Gráfico 37: Comparación de tiempos en sensibilidad de camiones	108
Gráfico 38: Velocidad de subida en función de la pendiente para camión de 20 Toneladas	117
Gráfico 39: Velocidad de subida en función de la pendiente para camión de 30 Toneladas	118
Gráfico 40: Velocidad de subida en función de la pendiente para camión de 60 Toneladas	118
Gráfico 41: Distribución de tiempo de carguío camión 60 ton.	119
Gráfico 42: Distribución de tiempo de carguío camión 30 ton.	120
Gráfico 43: Distribución de tiempo de carguío camión 20 ton.	121
Gráfico 44: Distribución de tiempo de descarga.	122
Gráfico 45: Distribución de tiempo de maniobra de carguío.	123
Gráfico 46: Distribución de tiempo de maniobra de descarga.	124
Gráfico 47: Distribución de factor de carga C010.	125
Gráfico 48: Distribución de factor de carga C013A.	126
Gráfico 49: Número de ciclo de camiones por caso y cantidad de camiones petroleados	127

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Disponibilidad Física.....	19
Ecuación 2: Disponibilidad Mecánica.	19
Ecuación 3: Utilización.	19
Ecuación 4: Factor Operacional.	19
Ecuación 5: Tiempo de ciclo de un camión.	19
Ecuación 6: Rendimiento Instantáneo de un camión.	20
Ecuación 7: Rendimiento Operacional de un camión.....	20
Ecuación 8: Requerimiento de Marina.	20
Ecuación 9: Flota de camiones.	20
Ecuación 10: Estado de los tramos.	50
Ecuación 11: Cantidad de corridas necesarias.	66