

TABLA DE CONTENIDO

PROPUESTA DE DISEÑO PARA PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA EN PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA	I
AGRADECIMIENTOS	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema	2
1.2. Proyecto de Memoria	7
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
1.4. Alcances	8
1.5. Metodología	9
2. MARCO TEORICO	10
2.1. Métodos de Comparación	10
2.1.1. Métodos Cualitativos	10
2.1.2. Métodos Cuantitativos	12
2.1.3. Métodos Mixtos	13
2.1.4. Metodología a Utilizar	14
2.2. Hundimiento por Bloques	16
2.3. Fragmentación de Roca en Hundimiento por Bloques	18
2.4. Sistema Minero	19
2.5. Explosivos y Accesorios de Tronadura	20
3. ANTECEDENTES GENERALES PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA	24
3.1. Ubicación y Dimensiones	24
3.2. Reseña Histórica	25
3.3. Situación Actual y Proyecto	25
3.4. Método de Extracción y Programa de Producción	27
3.5. Filosofía Operacional	28
3.6. Subnivel de Extracción	30

3.6.1.	Equipos	31
3.6.2.	Definición del Uso del Tiempo	33
3.7.	Sistema Semiautónomo del Equipo Load Haul Dump (LHD)	35
3.7.1.	Arquitectura del Sistema de Operación	35
3.7.2.	Sistemas en el CIO&G	36
3.7.3.	Sistemas a Bordo del equipo LHD	39
3.7.4.	Zona de Transición	40
4.	INTERRUPCIONES DEL FLUJO DE MINERAL	41
4.1.	Clasificación de Interrupciones	41
4.1.1.	Bolones	41
4.1.2.	Colgaduras	42
4.2.	Estadísticas	43
4.2.1.	Mina Inca Central Oeste, División Salvador	44
4.2.2.	Mina Rio Blanco, División Andina	45
4.2.3.	Reservas Norte, División El Teniente	46
4.3.	Estimaciones Chuquicamata Subterránea	48
5.	LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA REDUCCIÓN SECUNDARIA	51
5.1.	Descuelgue de zanjas de producción	51
5.1.1.	Cargas propulsadas por cañón	51
5.1.2.	Cañón de Agua	53
5.1.3.	Descolgador Telescópico	54
5.1.4.	Descuelgue Manual	56
5.1.5.	Descuelgue Manual con Bolsa Expansiva	57
5.1.6.	Jumbo de Descuelgue	58
5.1.7.	Resumen de Alternativas para el Descuelgue de Zanjas	60
5.2.	Reducción de bolones en puntos de extracción	61
5.2.1.	Dumbo Cachorrero	61
5.2.2.	Equipo Hidrofracturador	62
5.2.3.	Jumbo Cachorrero	63
5.2.4.	Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica	64
5.2.5.	Martillo Móvil	65
5.2.6.	Parche Explosivo	66

5.2.7.	Resumen de Alternativas para la Reducción de Bolones	67
6.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	68
6.1.	Metodología de Selección.....	68
6.2.	Criterios de Decisión.....	69
6.3.	Evaluación de Alternativas	71
6.3.1.	Descuelgue de zanjas de producción	71
6.3.2.	Reducción de bolones en puntos de extracción	73
6.4.	Alternativas Seleccionadas	74
7.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	75
7.1.	Modelo de Simulación.....	75
7.1.1.	Consideraciones del modelo	76
7.1.2.	Inputs y outputs del modelo.....	77
7.1.3.	Resultados.....	77
7.2.	Descuelgue de Zanjas de Producción	78
7.2.1.	Caso Base: Descuelgue Manual	78
7.2.2.	Alternativas de Descuelgue	80
7.3.	Reducción de Bolones en Puntos de Extracción	85
7.3.1.	Caso Base: Jumbo Cachorrero.....	85
7.3.2.	Alternativas de Reducción	87
7.4.	Selección de Alternativas	91
7.4.1.	Criterios de Selección.....	91
7.4.2.	Descuelgue de Zanjas de Producción	91
7.4.3.	Reducción de Bolones en Punto de Extracción	92
8.	DISEÑO DE PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA	94
8.1.	Descuelgue de Zanjas de Producción	94
8.1.1.	Descripción de la Actividad.....	94
8.1.2.	Responsabilidades	96
8.1.3.	Procedimiento	99
8.1.4.	Flujograma del Proceso	102
8.2.	Reducción de Bolones en Puntos de Producción.....	103
8.2.1.	Descripción de la Actividad.....	103
8.2.2.	Responsabilidades	105

8.2.3. Procedimiento	107
8.2.4. Flujograma del Proceso	110
9. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	111
10. GLOSARIO.....	113
11. BIBLIOGRAFÍA.....	118
12. ANEXOS.....	120
Anexo A. Tiempos de Proceso y Productividad Equipos LHD.....	120
Anexo B. Producción por Semi Calle de Extracción.....	121
Anexo C. Matriz de Comparación de Pares.....	122
Anexo D. Evaluación de Alternativas de Reducción Secundaria.	123
Anexo E. Frecuencia Estimada de Colgaduras.....	125
Anexo F. Frecuencia Estimada de Sobre Tamaños.....	127
Anexo G. Distribución Burr.	129
Anexo H. Cotización Equipos MacLean.	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Demoras y pérdidas productivas estimadas por inspecciones.	3
Tabla 2. Frecuencia y tiempos de reparación estimados en subnivel de producción.	3
Tabla 3. Estimación de la producción perdida por reparaciones en el subnivel de producción.	3
Tabla 4. Estimación de la producción perdida por descuelgue de zanjas.	4
Tabla 5. Estimación de la producción perdida por reducción secundaria.	4
Tabla 6. Estimación del tiempo utilizado en traslado de equipos LHD.	5
Tabla 7. Estimación de la producción perdida por traslado de equipos.	5
Tabla 8. Resumen de pérdidas productivas estimadas interferencias operacionales.	5
Tabla 9. Métodos de comparación.	15
Tabla 10. Resumen de clasificación de colgaduras.	43
Tabla 11. Porcentaje medido de colgaduras según su altura. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.	49
Tabla 12. Análisis de productividad. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.	50
Tabla 13. Cargas propulsadas con cañón – Principales Características.	52
Tabla 14. Cañón de agua – Principales características.	54
Tabla 15. Descolgador Telescópico – Principales características.	56
Tabla 16. Procedimiento manual de descuelgue – Principales características.	57
Tabla 17. Procedimiento manual de descuelgue con bolsa expansiva – Principales características.	58
Tabla 18. Jumbo Descolgador – Principales características.	60
Tabla 19. Resumen de alternativas de descuelgue de zanjas.	60
Tabla 20. Dumbo Cachorrero – Principales características.	61
Tabla 21. Jumbo Hidrofracturador – Principales características.	63
Tabla 22. Jumbo Cachorrero – Características principales.	64
Tabla 23. Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica – Principales características.	65
Tabla 24. Martillo Móvil – Principales características.	66
Tabla 25. Procedimiento de reducción con parche explosivo – Principales características.	67
Tabla 26. Resumen de alternativas de reducción de bolones.	67
Tabla 27. Ponderadores para evaluación de alternativas.	70
Tabla 28. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue.	71
Tabla 29. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones.	73
Tabla 30. Alternativas seleccionadas para la etapa de evaluación cuantitativa.	74
Tabla 31. Resultados de simulación.	77
Tabla 32. Tiempos estimados del proceso de descuelgue manual.	78
Tabla 33. Indicadores productivos descuelgue manual (resultados de simulación).	78
Tabla 34. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero.	79
Tabla 35. Parámetros mano de obra.	79
Tabla 36. Costo de combustible Jumbo Cachorrero.	79

Tabla 37. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero.	79
Tabla 38. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Descuelgue Manual.	79
Tabla 39. Costos totales estimados – Descuelgue Manual.	80
Tabla 40. Indicadores productivos (resultados de simulación) - Descuelgue Manual.	80
Tabla 41. Tiempos estimados de proceso de alternativas de descuelgue.	81
Tabla 42. Indicadores productivos alternativas de descuelgue (resultados de simulación).	81
Tabla 43. Costo de adquisición Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua.	81
Tabla 44. Costo de adquisición Descolgador Telescópico.	82
Tabla 45. Costos de combustible Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua.	82
Tabla 46. Costo de energía eléctrica Descolgador Telescópico.	83
Tabla 47. Costo de mantenimiento alternativas de descuelgue.	83
Tabla 48. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo de Descuelgue.	83
Tabla 49. Costos estimados en insumos para reducción secundaria –Descolgador Telescópico.	83
Tabla 50. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Cañón de Agua.	84
Tabla 51. Costos totales estimados – Alternativas de descuelgue.	84
Tabla 52. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de descuelgue.	84
Tabla 53. Tiempos del proceso de reducción con Jumbo Cachorrero.	85
Tabla 54. Indicadores productivos reducción con Jumbo Cachorrero (resultados de simulación).	85
Tabla 55. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero.	86
Tabla 56. Costo de combustible Jumbo Cachorrero.	86
Tabla 57. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero.	86
Tabla 58. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo Cachorrero.	86
Tabla 59. Costos totales estimados – Jumbo Cachorrero.	87
Tabla 60. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Jumbo Cachorrero.	87
Tabla 61. Tiempos estimados de proceso de alternativas de reducción d bolones.	88
Tabla 62. Indicadores productivos reducción con equipos alternativos (resultados de simulación).	88
Tabla 63. Costo de adquisición alternativas de reducción de bolones.	88
Tabla 64. Costo de combustible alternativas de reducción de bolones.	89
Tabla 65. Costo de mantenimiento alternativas de reducción de bolones.	89
Tabla 66. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Equipo Hidrofracturador.	90
Tabla 67. Costos totales estimados – Alternativas de reducción.	90

Tabla 68. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de reducción.	90
Tabla 69. Resumen costos estimados – Alternativas de descuelgue de zanjas.	91
Tabla 70. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de descuelgue de zanjas.	92
Tabla 71. Resumen costos estimados – Alternativas de reducción de bolones.	93
Tabla 72. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de reducción de bolones.	93
Tabla 73. Tiempos proceso de extracción del equipo LHD. Fuente: Pruebas Alfa, Caterpillar Inc.	120
Tabla 74. Productividad equipo LHD.	120
Tabla 75. Productividad de semi calles.	121
Tabla 76. Matriz de comparación de pares para evaluar y cálculo de ponderadores. .	122
Tabla 77. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH.	123
Tabla 78. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH.	123
Tabla 79. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO.	123
Tabla 80. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO.	124
Tabla 81. Evaluación de alternativas de descuelgue. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO.	124
Tabla 82. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO.	124
Tabla 83. Corrección de datos experimentales.	125
Tabla 84. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras.	126
Tabla 85. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras.	128
Tabla 86. Cotización de equipos de reducción secundaria MacLean.	130

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estadística de accidentes fatales en la minería. Chile, periodo 2010-2015. Fuente: SERNAGEOMIN.	6
Ilustración 2. Método Block Caving.	16
Ilustración 3. Punto de extracción. Imagen real de un punto de extracción (izquierda) y animación del proceso productivo (derecha).	17
Ilustración 4. Niveles de un macro bloque en Mina Chuquicamata Subterránea.	17
Ilustración 5. Tipos de fragmentación.	19
Ilustración 6. Explosivo tipo ANFO.	21
Ilustración 7. Cordón detonante.	21
Ilustración 8. Detonador.	21
Ilustración 9. Diferentes tipos de emulsión en función de la proporción Emulsión/ANFO.	22
Ilustración 10. Explosivo tipo APD.	22
Ilustración 11. Explosor eléctrico.	23
Ilustración 12. Iniciador de pistón.	23
Ilustración 13. Mapa de ubicación Mina Chuquicamata.	24
Ilustración 14. Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.	26
Ilustración 15. Plan de producción Mina Chuquicamata Subterránea.	28
Ilustración 16. Filosofía Operacional PMCHS.	28
Ilustración 17. Benchmarking del costo unitario real en minas subterráneas y proyectos de CODELCO.	29
Ilustración 18. Vista de planta de un nivel de producción.	30
Ilustración 19. Representación del nivel de producción en PMCHS.	31
Ilustración 20. Load Haul Dump Semiautónomo.	31
Ilustración 21. Jumbo de Reducción Secundaria.	32
Ilustración 22. Martillo Picador.	32
Ilustración 23. Definición del uso del tiempo.	33
Ilustración 24. Diagrama de arquitectura del sistema de operación.	35
Ilustración 25. Coexistencia de operaciones manuales y semiautónomas.	37
Ilustración 26. Estación de operador de LHDs.	38
Ilustración 27. Controles de mando remoto del equipo LHD.	39
Ilustración 28. Escáner laser del equipo LHD.	39
Ilustración 29. Ejemplo de Zona de Transición.	40
Ilustración 30. Cuadrilla reduciendo bolones agrupados por acopio.	41
Ilustración 31. Tipos de colgadura.	42
Ilustración 32. Frecuencia de descuelgue y cachorro de bolones. Mina Inca Central Oeste.	45
Ilustración 33. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Mina Rio Blanco.	46
Ilustración 34. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 4 – Mina Reservas Norte.	47

Ilustración 35. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 10 – Mina Reservas Norte.	47
Ilustración 36. Histograma de colgaduras experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.	49
Ilustración 37. Procedimiento de descuelgue con cargas propulsadas por cañón.	51
Ilustración 38. Sistema QuikDraw, empresa RockTek Co.	52
Ilustración 39. Cañón de agua modelo WC3 de la empresa MacLean.	53
Ilustración 40. Descolgador Telescópico prototipado por CODELCO.	54
Ilustración 41. Procedimiento de descuelgue del Descolgador Telescópico.	55
Ilustración 42. Procedimiento de descuelgue manual.	56
Ilustración 43. Jumbos de Descuelgue. Equipo SB9, empresa MacLean (Izquierda) y equipo BH40D, empresa RDH (Derecha).	58
Ilustración 44. Procedimiento de descuelgue con Jumbo de Descuelgue.	59
Ilustración 45. Radio de giro del brazo perforador.	59
Ilustración 46. Dumbo Cachorrero en producción.	61
Ilustración 47. Jumbo Hidrofracturador.	62
Ilustración 48. Procedimiento de reducción del Jumbo Hidrofracturador.	62
Ilustración 49. Jumbo Cachorrero Sandvik DD310.	63
Ilustración 50. Equipo dozer con dispositivo de cuña hidráulica.	64
Ilustración 51. Martillo Móvil RB3 de la empresa MacLean.	65
Ilustración 52. Reducción secundaria con parche explosivo.	66
Ilustración 53. Matriz de comparación de pares.	68
Ilustración 54. Focos y criterios de decisión.	70
Ilustración 55. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue de zanjas.	72
Ilustración 56. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, descuelgue de zanjas.	72
Ilustración 57. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones.	73
Ilustración 58. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, reducción de bolones.	74
Ilustración 59. Animación del modelo de simulación.	75
Ilustración 60. Resultados evaluación cualitativa, ítem “Seguridad del Personal”.	92
Ilustración 61. Flujograma de información en el proceso de descuelgue de zanjas.	96
Ilustración 62. Flujograma procedimiento de descuelgue de zanjas de producción.	102
Ilustración 63. Flujograma de información en el proceso de reducción de bolones.	104
Ilustración 64. Flujograma procedimiento de reducción de bolones en punto de extracción.	110
Ilustración 65. Histograma corregido de colgaduras en PMCHS, datos experimentales.	125
Ilustración 66. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de colgaduras.	126
Ilustración 67. Histograma corregido de colgaduras en PMCHS, datos experimentales.	127

Ilustración 68. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de
sobre tamaños. 127