

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS DEL TRABAJO DE MEMORIA	4
1.2.1	Objetivo General	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	ALCANCES	4
1.4	METODOLOGÍA DEL TRABAJO	5
CAPÍTULO 2	ESTADO DEL ARTE	6
2.1	INTRODUCCIÓN	6
2.2	ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DIVISIÓN EL TENIENTE	6
2.2.1	Modelo operacional con equipos LHD manuales en DET	6
2.2.2	Modelo operacional empleado en la prueba de Fase I de DR	9
2.2.3	Análisis extracción tele-comandada en sectores DR y RENO	10
2.2.4	Análisis de eventos de barro en Bloque 1 – Esmeralda	12
2.3	ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DOZ DE FREEPORT	13
2.3.1	Estrategia de extracción de agua/barro	13
2.3.2	Razón de mezcla en piques de traspaso	14
2.4	RESUMEN DE LA EXTRACCIÓN EN DET Y DOZ	15
2.5	TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO	16
2.6	SIMULACIÓN DE PROCESOS	17
2.6.1	Elementos clave en un modelo de simulación	18
2.7	ANTECEDENTES DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO (PT FREEPORT, INDONESIA)	19
2.7.1	Objetivo del modelo de simulación de PT Freeport para DOZ y ESZ	19
2.7.2	Metodología para la construcción del modelo de simulación	19
2.7.3	Descripción del Sistema	20
2.7.4	Resultados de la simulación	21
2.7.5	Conclusiones del estudio (J. Botha, 2008)	21
2.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	22
CAPÍTULO 3	CASO DE ESTUDIO, SECTOR DIABLO REGIMIENTO	23
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	26
4.1	INTRODUCCIÓN	26
4.2	METODOLOGÍA PROPUESTA	26
4.2.1	Etapa 1: Recopilación de antecedentes de extracción de material saturado	26
4.2.2	Etapa 2: Colección base de datos	26
4.2.3	Etapa 3: Generación del modelo conceptual	27
4.2.4	Etapa 4: Construcción modelo simulación	27
4.2.5	Etapa 5: Calibración y Comprobación del modelo de simulación	27
4.2.6	Etapa 6: Simulaciones del modelo operacional	27
4.2.7	Etapa 7: Análisis de resultados	27
4.2.8	Etapa 8: Documentación y Conclusiones	28
CAPÍTULO 5	MODELO CONCEPTUAL DE SIMULACIÓN	29
5.1	INFRAESTRUCTURA DE LA MINA	29

5.2	ENTIDADES OPERATIVAS	29
5.3	ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN	30
5.3.1	Puntos de Extracción	30
5.3.2	Calles de Producción	31
5.3.3	Piques de traspaso	32
5.3.4	Mineral	32
5.3.5	Equipo LHD manual y tele-asistido	32
5.3.6	Operación de descuelgue y reducción secundaria sin extracción de agua/barro	35
5.3.7	Turnos de extracción, estabilización y chequeo para extracción de agua/barro	36
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	38
CAPÍTULO 6 CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL		39
6.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL	39
6.1.1	Componentes del modelo	40
6.2	DATOS DE ENTRADA PARA LA CALIBRACIÓN	41
6.2.1	Equipos LHD Manuales	42
6.2.2	Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños	42
6.2.3	Frecuencia de fallas y mantenencias de equipos, calles y piques	43
6.2.4	Velocidad de extracción planificada y máxima	44
6.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	45
6.3.1	Número de réplicas	48
6.3.2	Análisis de sensibilidad	49
6.3.3	Comprobación del modelo	49
6.3.4	Conclusiones	50
CAPÍTULO 7 SIMULACIONES DEL MODELO OPERACIONAL		51
7.1	SELECCIÓN SECTOR PARA LA SIMULACIÓN: FASE II, MINA DIABLO REGIMIENTO	51
7.2	REGLAS OPERACIONALES DE EXTRACCIÓN CON EQUIPOS LHD TELE-ASISTIDOS	52
7.3	PLAN DE SIMULACIONES	55
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	56
7.4.1	Tonelaje Mensual Extraído [Ton]	56
7.4.2	Uniformidad Del Tiraje [%]	60
7.4.3	Velocidad De Extracción Media [t/m ² -Día]	64
7.4.4	Tonelaje Mensual De Finos Extraídos [Ton]	70
7.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	72
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		74
CAPÍTULO 9 BIBLIOGRAFÍA		77
ANEXO A	CÁLCULO DE UNIFORMIDAD DEL TIRAJE	79
ANEXO B	DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN (OCTUBRE 2013 Y DICIEMBRE 2015)	80
ANEXO C	DISPERSIÓN PUNTO A PUNTO DE LA CALIBRACIÓN	82
ANEXO D	RESULTADOS DE RÉPLICAS	84
ANEXO E	CÁLCULO DE INTERVALO DE CONFIANZA Y DISTRIBUCIÓN T DE	85
STUDENT		
ANEXO F	ESTRATEGIAS DE TURNOS CON TELE-ASISTIDO	87
ANEXO G	CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL	89
ANEXO H	LEY DE CU % POR PUNTO DE EXTRACCIÓN	99

I. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2017 (2016).	1
Figura 2: Tasa de declaración de puntos en estado agua/barro y limitados en función de la utilización de equipos tele-comando. (BCTEC, 2016).....	2
Figura 3: Principales etapas de la metodología propuesta.....	5
Figura 4: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2016 (2016).	7
Figura 5: Ubicación Fases DR – Estado de los Puntos. Mina Diablo Regimiento. 31/07/2012. (García P., 2012).....	9
Figura 6: Configuración de ubicación de puertas. (García, 2012).....	9
Figura 7: Histograma de la velocidad de extracción mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016).....	10
Figura 8: Velocidad de extracción en función de la humedad. Puntos extraídos mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016)	11
Figura 9: Esquematización sistema de traspaso – Buzones. Tradicional, IOZ con placa y DOZ sin placa directo a camiones. (BCTEC, 2016)	14
Figura 10: Componentes de un equipo LHD tele-comandado (Dadhich 2016).	16
Figura 11: Cañón de agua MacLean WC3.	17
Figura 12: Layout de producción (DOZ/ESZ). (J. Botha, 2008).....	20
Figura 13: Proceso de producción Diablo Regimiento. (Paillacan, 2010)	23
Figura 14: Ubicación Mina Diablo Regimiento (Pardo, C., Rojas, E. 2016).....	24
Figura 15: Etapas de la metodología de simulación propuesta.	26
Figura 16: Secuencia de extracción de equipos LHD manual y tele-asistido (no indica número de baldadas por punto).	34
Figura 17: Ejemplo de escenarios para determinar si debe intervenir la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria.	35
Figura 18: Modelamiento de asignación de equipos LHD tele-asistido a puntos de extracción... ..	37
Figura 19: Esquema del modelo de simulación construido de 3 calles de producción.	39
Figura 20: Estado de puntos de extracción calles 41, 43 y 45 mina Diablo Regimiento, octubre 2013.	41
Figura 21: Frecuencia de colgaduras de mineral grueso y sobre-tamaños. (Guerrero, 2014 y Hurtado, 2014).....	42
Figura 22: Fase II mina Diablo Regimiento, condición a diciembre del 2015.....	51
Figura 23: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido.	87
Figura 24: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos.	87
Figura 25: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido.	88
Figura 26: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos.	88
Figura 27: Vista de PROMODEL	89

II. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Recuperación de tonelaje planificado en sectores DET (BCTEC, 2016).....	2
Tabla 2: Descripción de los estados de los puntos de extracción de la mina Esmeralda (BCTEC, 2016).....	7
Tabla 3: Velocidad de extracción aplicada a los puntos según su estado (análisis de la extracción del Bloque 1 de Esmeralda) (BCTEC, 2016)	8
Tabla 4: Uniformidad del PAM, CARTIR y tonelaje real extraído. Resultados basados en el análisis de la base de datos de extracción del Bloque 1 de Esmeralda. (BCTEC, 2016)	8
Tabla 5: Secuencia de extracción con 1 LHD-SA. (García, 2012).....	10
Tabla 6: Clasificación cualitativa de la humedad – GRMD-SGP-I-027-/2016 (Codelco, 2016)..	11
Tabla 7: Velocidades de puntos extraídos con LHD tele-comandos en función de la humedad observada en el punto. (BCTEC, 2016).....	11
Tabla 8: Uniformidad para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016)	12
Tabla 9: Velocidad máxima para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016).....	12
Tabla 10: Velocidades de extracción diaria [t/m2-día] con equipos tele-comando para DOZ. (BCTEC, 2016).....	13
Tabla 11: Resumen Modelos Operacionales. (BCTEC, 2016).....	15
Tabla 12: Descripción de tecnologías para la operación de equipos LHD (Dadhich, 2016).	16
Tabla 13: Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños según tipo de roca. (Toneladas entre eventos) (J. Botha, 2008)	20
Tabla 14: Resultados de simulación. (J. Botha, 2008)	21
Tabla 15: Remanente por calle, DR, Fase II (GRMD, CODELCO 2016).	24
Tabla 16: Cálculo del número crítico de puntos disponibles.	36
Tabla 17: Dos turnos de estabilización para un caso de 2 equipos LHD tele-asistidos.	36
Tabla 18: Componentes del modelo de simulación.....	40
Tabla 19: Características principales del equipo LHD de 13 yd3 (catálogo Sandvik Toro 0010). Se considera una distribución uniforme con el valor promedio más y menos un 20% de variación para cada parámetro.....	42
Tabla 20: Altura de columna extraída promedio para las calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento (Dic. 2015)	43
Tabla 21: Tiempos y tasa de falla de largaduras y reducción secundaria (Maass, 2013) y (Guerrero, 2014).....	43
Tabla 22: Frecuencias y tiempos de mantención de equipos LHD, calles y piques de traspaso (PPM mensual ES Bloque 1 y 2 mes de agosto-2015, Informe mensual de maquinarias Geovita Sept-Oct 2015).....	44
Tabla 23 Velocidad de extracción planificada y máxima para la operación manual. (PAM y CARTIR Octubre 2013, CODELCO)	44
Tabla 24: Tonelaje extraído simulado por sector de 3 calles para el mes de octubre 2013.	46
Tabla 25: Error del tonelaje extraído por punto simulado para el mes de octubre del 2013.....	47

Tabla 26: Resultados de replicaciones de la simulación.	48
Tabla 27: Resultados análisis de sensibilidad.....	49
Tabla 28: Tonelaje planificado y extraído para el mes de diciembre del 2015.....	52
Tabla 29: Reglas de operación con equipos LHD tele-asistidos.	52
Tabla 30: Continuación de la tabla anterior.....	53
Tabla 31: Continuación de la tabla anterior.....	54
Tabla 32: Dos turnos de estabilización para el caso de 2 equipos tele-asistidos.....	54
Tabla 33: Estrategias de extracción con equipos LHD tele-asistidos.....	55
Tabla 34 Resultados de tonelaje total extraído (Puntos operativos, barro y total).	59
Tabla 35: Uniformidad del tiraje [%].	63
Tabla 36: Velocidad de extracción [t/m2-día].....	67
Tabla 37: Resumen de resultados para 2 turnos de estabilización.	68
Tabla 38: Resumen de resultados para 1 turno de estabilización.	69
Tabla 39: Fino de Cu extraído en el periodo simulado para cada estrategia [ton].	70
Tabla 40: Datos de entrada por punto de extracción. (Calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento)	80
Tabla 41: Nomenclatura de los estados de puntos de extracción.	81
Tabla 42: Tonelaje extraído por la simulación, para cada replica con distinta semilla.....	84
Tabla 43: Distribución de t-student.	86
Tabla 44: Ley de Cu % por punto de extracción.	99

III. ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tonelaje extraído simulado versus horas de trabajo de palas por turno.....	45
Gráfico 2: Error respecto del tonelaje real extraído por punto [%] v/s horas de trabajo por pala [h].	46
Gráfico 3: Comparación punto a punto entre tonelaje simulado por punto y tonelaje extraído real.	47
Gráfico 4: Histograma de réplicas de la simulación.....	48
Gráfico 5: Comprobación del modelo de simulación.....	50
Gráfico 6: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Turnos de estabilización.....	56
Gráfico 7: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m2-día].	57
Gráfico 8: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Número de equipos LHD tele-asistidos.....	57
Gráfico 9: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).....	58
Gráfico 10: Uniformidad del tiraje [%] v/s Turnos de estabilización.	60
Gráfico 11: Uniformidad del tiraje [%] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m2-día]....	60
Gráfico 12: Uniformidad del tiraje [%] v/s Número de LHD tele-asistidos.	61
Gráfico 13: Uniformidad del tiraje [%] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).	62
Gráfico 14: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización.	64
Gráfico 15: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización (caso 1 LHD tele-asistido).	65

Gráfico 16: Velocidad de extracción media [ton/m ² -día] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m ² -día].	65
Gráfico 17: Velocidad de extracción media [ton/m ² -día] v/s Número de equipos LHD teleasistidos.	66
Gráfico 18: Velocidad de extracción media [ton/m ² -día] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).	66
Gráfico 19: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 1 y 2 horas de trabajo de palas por turno.	82
Gráfico 20: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 3 y 4 horas de trabajo de palas por turno.	82
Gráfico 21: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 4,5 y 5,5 horas de trabajo de palas por turno.	83
Gráfico 22: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 6 y 7 horas de trabajo de palas por turno.	83

IV. ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1: Número crítico de puntos disponibles para la entrada de la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria.	35
Fórmula 2: Cálculo del índice de uniformidad [%].	79
Fórmula 3: Intervalo de confianza para una distribución normal.	85