



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

**FUNDAMENTOS OPERACIONALES, PRODUCTIVOS Y DE AUTOMATIZACIÓN
DEL SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA**

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

JOSÉ ADRIÁN RIQUELME AGUILAR

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
MARIO VICUÑA MARÍN
ELEONORA WIDZYK-CAPEHART

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2014

El Sistema de Minería Continua impulsado por CODELCO conforma un quiebre tecnológico para los sistemas de extracción minera de hundimiento, pues permitiría incrementar las velocidades medias de extracción a valores sobre 1 t/día/m². En consecuencia, resulta relevante sustentar los fundamentos que caracterizan la operación del sistema, así como estudiar su potencial productivo y de automatización.

El objetivo principal de este trabajo de tesis es establecer los fundamentos de la planificación de extracción a corto plazo de la Minería Continua y sentar las bases para su potencial automatización. Para ello, se procede a realizar experimentos a escala reducida representativos de una calle de producción del módulo de Minería Continua a validar en División Andina de CODELCO, con los cuales se busca: (1) caracterizar la interacción de los componentes de extracción Dozer – Panzer; (2) determinar la productividad del Sistema de Minería Continua bajo ciertas configuraciones de operación y fragmentación; (3) determinar el impacto de la automatización de la Minería Continua sobre la productividad y utilización del Panzer.

En lo que concierne a la caracterización de la interacción Dozer-Panzer, para las granulometrías G1 ($d_{50} = 0,8$ m) y G2 ($d_{50} = 0,97$ m) se obtienen productividades de los equipos Dozer de 9,54 ($\pm 9,30$) t/ciclo y de 9,99 ($\pm 7,77$) t/ciclo, respectivamente; adicionalmente, se obtienen largos de descarga de los Dozer de 9,59 ($\pm 4,88$) m y de 8,29 ($\pm 4,09$) m, respectivamente.

En cuanto a los resultados de las pruebas de pilotaje realizadas se tiene: (1) el Sistema de Minería Continua, bajo una granulometría G1, alcanza la meta productiva de 3 t/día/m², mientras que al ser automatizado llega a valores sobre 5 t/día/m²; (2) las productividades máximas de la calle de producción alcanzadas bajo ambas granulometrías superan las 5.000 t/día; (3) un incremento en un 22% del tamaño medio de las partículas impacta disminuyendo la productividad y utilización del sistema sin automatización, llegando a un 45% menos de productividad diaria; (4) el principal efecto de la aplicación de una estrategia de descuelgue inmediato de zanjas, además del consecuente aumento productivo, es una reducción de la brecha entre las productividades y utilidades de ambos escenarios de fragmentación; (5) se identifica una tendencia incremental tanto de la productividad como de la utilización al utilizar un número mayor de Dozer operativos.

Finalmente, se concluye la gran variabilidad del sistema estudiado en cuanto a su productividad y acoples entre descargas. Para las condiciones experimentales presentadas en este trabajo se prevé el cumplimiento de los objetivos productivos del módulo. Por otro lado, la implementación de un sistema de automatización permite alcanzar mayores valores de productividad, velocidad de extracción y utilización del Panzer. Como trabajo futuro se propone hacer una mayor cantidad de experimentos y réplicas, además de validar los resultados de este trabajo con datos reales.

ABSTRACT

Continuous Mining System proposed by CODELCO forms a technological breakthrough for caving mining methods, because it would increase extraction rates to values over 1 t/day/m². Therefore, it is important to understand the operational characteristics of the system and to study its production and automation potential.

The main objective of this thesis work is to establish the short-term extraction planning fundamentals for Continuous Mining and lay the basis for its potential automation. Thus, are conducted pilot tests at representative scale of a production street of the Continuous Mining module to validate at Andina Division of CODELCO. These tests attempt to: (1) characterize the interaction of the Dozer-Panzer extraction components; (2) determine de productivity of the Continuous Mining System; (3) determine the impact of automation on productivity and utilization of the Panzer.

Regarding the interaction of Dozer-Panzer, for G1 ($d_{50} = 0.80\text{ m}$) and G2 ($d_{50} = 0.97\text{ m}$) particle size distributions are obtained Dozer productivities of 9.54 (± 9.30) t/cycle and 9.99 (± 7.77) t/cycle, respectively. In addition, are obtained Dozer's dump lengths of 9.59 (± 4.88) m and 8.29 (± 4.09) m, respectively.

The results of the pilot tests indicate that: (1) using a G1 particle size distribution, Continuous Mining System reaches the production goal of 3 t/day/ m², while the automated system achieves values over 5 t/day/ m²; (2) maximum productivities achieved exceed 5,000 t/day; (3) an increase by 22% in the average size of the particles impacts in a reduction of approximately 45% of the daily productivity when operating under a non-automation scenario; (4) by including immediate hang ups removal strategy, the effect of a coarser particle size is inhibited, obtaining similar productivity for both cases of fragmentation; (5) there is a trend to increase productivity and utilization when using a larger number of operating Dozer.

Finally, it is concluded that the Dozer-Panzer system has high variability in terms of its productivity and coupling between discharges. For experiments and short-term planning conditions of this research, it is anticipated the fulfillment of production targets of the Continuous Mining module. The implementation of an automation system achieves higher values of productivity, extraction rate and utilization of the Panzer. As future work, it is proposed to develop a greater number of experiments and replicates. Also, it is recommended to validate the results of this work with real data arising from industrial test at Andina Division.

*A mis padres,
por su inconmensurable amor, dedicación y apoyo.*

*A mis musas: Sofía y Carolina,
por ser una eterna fuente de iluminación e inspiración.*

AGRADECIMIENTOS

A mi familia primordial: padres y hermano. Gracias por su apoyo y momentos inolvidables de felicidad. Gracias por comprender lo incomprensible de mi comportamiento y soportarme.

A la familia que he formado: Sofía y Carolina. En tres palabras: gracias por existir. Son el origen de mis mejores pensamientos y acciones.

A mis amistades del Departamento de Ingeniería de Minas, por enseñarme que existen personas con integridad y valores intachables. Compas de por vida y más allá. Ustedes saben quienes son.

A mis amigos y compañeros del BCLAB, por aquellos instantes de reflexión, leseo, razonamiento colectivo, risas, leseo, almuerzos fisiológicos, cervezas, leseo,..., entre otros.

A mi profesor guía, Sr. Raúl Castro, por sus consejos y sabias palabras.

A los miembros de mi comisión, por leer y recomendar modificaciones de la tesis.

A los funcionarios del Departamento de Ingeniería de Minas, por su buena voluntad y disposición.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.4 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.5 METODOLOGÍA.....	3
1.6 CONTENIDOS DE LA TESIS.....	4
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.2 SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA.....	5
2.2.1 <i>Diseño</i>	5
2.2.2 <i>Productividad</i>	9
2.2.3 <i>Equipos</i>	10
2.3 PRUEBAS DEL SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA.....	13
2.3.1 <i>Pruebas a Escala Industrial</i>	13
2.3.2 <i>Pruebas a Escala Laboratorio</i>	18
2.4 CONCLUSIONES.....	21
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 INTRODUCCIÓN.....	23
3.2 CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS.....	23
3.3 CONDICIONES Y DISEÑO DEL MODELO FÍSICO.....	25
3.3.1 <i>Escala</i>	25
3.3.2 <i>Diseño y Operación</i>	25
3.3.3 <i>Método de Extracción: Equipo Dozer</i>	28
3.3.4 <i>Método de Transporte: Equipo Panzer</i>	28
3.4 INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	29
3.4.1 <i>Instrumentación</i>	29
3.4.2 <i>Sistema de Automatización</i>	30
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	36
3.6 METODOLOGÍA.....	40
3.7 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO GENERAL EN PRUEBAS DE PILOTAJE.....	41
3.8 CONCLUSIONES.....	41
CAPÍTULO 4: PRUEBAS DE PILOTAJE DE LA MINERÍA CONTINUA.....	42
4.1 INTRODUCCIÓN.....	42
4.2 PLAN EXPERIMENTAL.....	42
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	44
4.3.1 <i>Experimento 1</i>	44
4.3.2 <i>Experimento 2.1</i>	44
4.3.3 <i>Experimento 2.2</i>	50
4.3.4 <i>Experimento 3</i>	52
4.3.5 <i>Experimento 4</i>	54

4.3.6	<i>Experimento 5</i>	59
4.3.7	<i>Experimento 6</i>	61
4.3.8	<i>Experimento 7</i>	63
4.4	RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	64
4.5	CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE PILOTAJE DE LA MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA		68
5.1	INTRODUCCIÓN	68
5.2	PLAN EXPERIMENTAL	68
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	69
5.3.1	<i>Experimento 1</i>	69
5.3.2	<i>Experimento 2</i>	71
5.3.3	<i>Experimento 3</i>	73
5.3.4	<i>Experimento 4</i>	74
5.4	RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	75
5.5	CONCLUSIONES	78
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		79
6.1	INTRODUCCIÓN	79
6.2	COMPARACIÓN CON MODELOS ANTERIORES	79
6.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO OPERACIONAL	81
6.4	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO	82
6.4.1	<i>Productividad y Velocidad de Extracción</i>	84
6.4.2	<i>Utilización del Panzer</i>	86
6.5	ANÁLISIS DE AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA	88
6.6	EVALUACIÓN CRÍTICA DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA	90
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		93
7.1	CONCLUSIONES	93
7.2	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	95
BIBLIOGRAFÍA		97
ANEXOS		98
ANEXO A: DISEÑO DE MINERÍA CONTINUA		98
ANEXO B: DETALLE PRUEBAS DE CARGA PUNTUAL		99
ANEXO C: GRANULOMETRÍA G2 – PMCHS		100
ANEXO D: DETALLE SISTEMA DE SENSADO		102
ANEXO E: DETALLE SISTEMA DE CONTROL		107
ANEXO F: AJUSTES ESTADÍSTICOS EN CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA DOZER-PANZER		108
ANEXO G: ALGORITMO DE GENERACIÓN DE SECUENCIAMIENTO DOZER		110
ANEXO H: TEST DE SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA		116
ANEXO I: REGRESIÓN LINEAL DE PRODUCTIVIDAD Y UTILIZACIÓN		117

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. VARIABLES Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN PARA DISEÑO DE NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA CONTINUA (LARA, 2008).....	7
TABLA 2.2. RESULTADOS SIMULADOS DE TASAS DE EXTRACCIÓN PARA DIFERENTES PRODUCTIVIDADES (LARA, 2008).....	7
TABLA 2.3. RESULTADOS DE CAPACIDADES Y RENDIMIENTOS PARA SIMULACIONES (LARA, 2008).....	7
TABLA 2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE MALLA EVALUADAS EN SIMULACIONES (LARA, 2008).....	8
TABLA 2.5. PREGUNTAS A RESOLVER EN TRABAJO DE TESIS	22
TABLA 3.1. FACTORES DE ESCALA USADOS EN PRUEBAS DE PILOTAJE.....	25
TABLA 3.2. DIMENSIONES DE MODELO FÍSICO EMPLEADO.....	25
TABLA 3.3. INSTRUMENTACIÓN A UTILIZAR EN EXPERIMENTOS	29
TABLA 3.4. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DEL SISTEMA DE SENSADO	34
TABLA 3.5. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EMPLEADAS	37
TABLA 3.6. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA G1 CON VALORES A ESCALA REAL Y ESCALADOS.	38
TABLA 3.7. DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EMPLEADAS EN PLAN EXPERIMENTAL	39
TABLA 4.1. VARIABLES Y PARÁMETROS DE PLAN EXPERIMENTAL PARA PRUEBAS DE PILOTAJE DE MINERÍA CONTINUA.....	42
TABLA 4.2. PLAN EXPERIMENTAL DETALLADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADO PARA PRUEBAS DE PILOTAJE DE MINERÍA CONTINUA.....	43
TABLA 4.3. INCONVENIENTES Y SOLUCIONES ASOCIADAS AL EXPERIMENTO DE PUESTA EN MARCHA.....	44
TABLA 4.4. RESULTADOS DE ESTADÍSTICAS DE LARGOS Y MASAS DE DESCARGAS DE DOZER	47
TABLA 4.5. PARÁMETROS DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD CON MEJOR AJUSTE A DATOS MEDIDOS	48
TABLA 4.6. RESULTADOS DE ESTADÍSTICAS DE LARGOS Y MASAS DE DESCARGAS DE DOZER PARA EXPERIMENTO 2.2	51
TABLA 4.7. PARÁMETROS DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD CON MEJOR AJUSTE A DATOS MEDIDOS PARA EXPERIMENTO 9.....	51
TABLA 4.8. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN SIN DESCUELGUE DE ZANJAS. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	59
TABLA 4.9. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN CON DESCUELGUE DE ZANJAS. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	60
TABLA 4.10. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE EXPERIMENTO 6 EN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN SIN DESCUELGUE. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	62
TABLA 4.11. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE EXPERIMENTO 7 EN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN CON DESCUELGUE. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	63

TABLA 4.12. RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS CUALITATIVOS PARA PRUEBAS DE PILOTAJE DE MINERÍA CONTINUA.....	64
TABLA 4.13. RESULTADOS CUANTITATIVOS DE EXPERIMENTOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA.....	65
TABLA 4.14. RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRODUCTIVIDADES DIARIAS Y VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN DE EXPERIMENTOS CON OPERACIÓN DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA. G: GRANULOMETRÍA	65
TABLA 4.15. RESULTADOS CUANTITATIVOS DE UTILIZACIONES DIARIAS DE EXPERIMENTOS CON OPERACIÓN DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA. G: GRANULOMETRÍA.....	65
TABLA 5.1. PLAN EXPERIMENTAL DETALLADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADO PARA PRUEBAS DE PILOTAJE DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA.....	68
TABLA 5.2. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN SIN DESCUELGO DE ZANJAS. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	69
TABLA 5.3. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 1 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS DOZER. SIN DESCUELGO DE ZANJAS.....	70
TABLA 5.4. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 1 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE OPERACIÓN SELECCIONADA	71
TABLA 5.5. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN CON DESCUELGO DE ZANJAS. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	71
TABLA 5.6. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 2 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS DOZER. CASO CON DESCUELGO DE ZANJAS	72
TABLA 5.7. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 2 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE OPERACIÓN SELECCIONADA	72
TABLA 5.8. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE EXPERIMENTO 3 EN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN SIN DESCUELGO. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	73
TABLA 5.9. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 3 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE OPERACIÓN SELECCIONADA	74
TABLA 5.10. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES Y UTILIZACIONES DE EXPERIMENTO 4 EN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA BAJO MODALIDAD DE OPERACIÓN CON DESCUELGO. G: GRANULOMETRÍA. “G1 Y G2” MUESTRA ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE AMBAS GRANULOMETRÍAS	74
TABLA 5.11. SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE DOZER PARA EXPERIMENTO 4 Y GRANULOMETRÍA G1 EN FUNCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE OPERACIÓN SELECCIONADA	75
TABLA 5.12. RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS CUALITATIVOS PARA PRUEBAS DE PILOTAJE DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA	75

TABLA 5.13. RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRODUCTIVIDADES DIARIAS Y VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN DE EXPERIMENTOS CON OPERACIÓN DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA. G: GRANULOMETRÍA	76
TABLA 5.14. RESULTADOS CUANTITATIVOS DE UTILIZACIONES DIARIAS DE EXPERIMENTOS CON OPERACIÓN DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA. G: GRANULOMETRÍA.....	76
TABLA 6.1. COMPARACIÓN DE PRODUCTIVIDADES MEDIAS DE PRUEBAS REALIZADAS PARA SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA.....	79
TABLA 6.2. ESTADÍSTICAS DE MODELO DE REGRESIÓN	83
TABLA 6.3. INCREMENTOS PORCENTUALES DE LAS PRODUCTIVIDADES DIARIAS Y VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MINERÍA CONTINUA Y MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA AL APLICAR ESTRATEGIA DE DESCUELQUE INMEDIATO DE ZANJAS, RESPECTO DEL CASO BASE SIN INTERVENCIÓN. G1 Y G2 INDICAN LAS GRANULOMETRÍAS EMPLEADAS.....	84
TABLA 6.4. INCREMENTOS PORCENTUALES DE LAS PRODUCTIVIDADES DIARIAS Y VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN COMO CONSECUENCIA DE PASAR DE UN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA (SMC) A UN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA (SMCA).....	85
TABLA 6.5. INCREMENTOS PORCENTUALES DE LAS UTILIZACIONES DIARIAS DEL PANZER DE LOS SISTEMAS DE MINERÍA CONTINUA Y MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA AL APLICAR ESTRATEGIA DE DESCUELQUE INMEDIATO DE ZANJAS, RESPECTO DEL CASO BASE SIN INTERVENCIÓN. G1 Y G2 INDICAN LAS GRANULOMETRÍAS EMPLEADAS	87
TABLA 6.6. INCREMENTOS PORCENTUALES DE LAS UTILIZACIONES DIARIAS DEL PANZER COMO CONSECUENCIA DE PASAR DE UN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA (SMC) A UN SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA (SMCA)	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA (ENCINA ET AL., 2008).....	6
FIGURA 2.2. ESQUEMA DE DOZER: (IZQUIERDA) VISTA ISOMÉTRICA DE DOZER Y PLACAS QUE LO COMPONEN; (DERECHA) VISTA POSTERIOR DEL DOZER UBICADO EN UN PUNTO DE EXTRACCIÓN (JRI, 2010)	10
FIGURA 2.3. PANZER.....	11
FIGURA 2.4. CADENAS DEL PANZER.....	11
FIGURA 2.5. CHANCADOR TIPO SIZER	12
FIGURA 2.6. UBICACIÓN DE LA PRUEBA INDUSTRIAL EN EL SALVADOR-INCA OESTE	13
FIGURA 2.7. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE MINERÍA CONTINUA EN EL SALVADOR.....	14
FIGURA 2.8. DOZER (IZQUIERDA) Y PANZER (DERECHA) INSTALADOS EN DIVISIÓN SALVADOR	15
FIGURA 2.9. UBICACIÓN MODULO MINERÍA CONTINUA DE VALIDACIÓN EN TERCER PANEL, DIVISIÓN ANDINA	16
FIGURA 2.10. DETALLE DE EQUIPOS EN SECTOR DOZER/PANZER (JRI, 2010).....	17
FIGURA 2.11. ESQUEMA DE PERFIL DE MÓDULO DE MINERÍA CONTINUA A IMPLEMENTAR EN DIVISIÓN ANDINA (JRI, 2010)	17
FIGURA 2.12. MODELO FÍSICO 2D PROYECTO MODELACIÓN FÍSICA MINERÍA CONTINUA: (IZQUIERDA) PERFIL DE MODELO SIN MATERIAL; (DERECHA) PERFIL DE MODELO CARGADO CON GRAVA.	18
FIGURA 2.13. PERFIL DE MODELACIÓN NUMÉRICA DE MINERÍA CONTINUA	19
FIGURA 2.14. MODELO FÍSICO 3D EMPLEADO EN PROYECTO MODELACIÓN FÍSICA MINERÍA CONTINUA FASE 2.0	20
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO I: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	24
FIGURA 3.2. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO II: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	24
FIGURA 3.3. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO III: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	24
FIGURA 3.4. MODELO FÍSICO CONSTRUIDO PARA ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN: (IZQUIERDA) MODELO FÍSICO CON PANEL ELÉCTRICO Y DE ACTUACIÓN; (DERECHA) PERSPECTIVA DEL MODELO FÍSICO CARGADO CON MATERIAL	26
FIGURA 3.5. PLANOS DEL MODELO FÍSICO EMPLEADO: (ARRIBA-IZQUIERDA) VISTA EN PERSPECTIVA; (ARRIBA-DERECHA) VISTA EN PERFIL TRANSVERSAL; (ABAJO-IZQUIERDA) VISTA EN PLANTA; (ABAJO-DERECHA) VISTA EN SECCIÓN LONGITUDINAL. UNIDADES EN CENTÍMETROS [CM]	26
FIGURA 3.6. VISTA EN PERSPECTIVA DE ÁPEX=0 EN INTERIOR DE MODELO FÍSICO SIN MATERIAL GRANULAR	27
FIGURA 3.7. PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA CONTINUA CON DIMENSIONES A REPRODUCIR EN EL MODELO FÍSICO (JRI, 2010).....	27

FIGURA 3.8. PERFIL DE CALLE DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA CONTINUA CON DIMENSIONES A REPRODUCIR EN EL MODELO FÍSICO (JRI, 2010).....	27
FIGURA 3.9. DISEÑO EQUIPO DOZER ESCALADO 1:50: (IZQUIERDA) VISTA EN PLANTA; (DERECHA) VISTA EN PERFIL. UNIDADES EN CENTÍMETROS [CM] (ORELLANA, 2012).....	28
FIGURA 3.10. DOZER EN EL MODELO A ESCALA: (IZQUIERDA) VISTA FRONTAL DE DOZER EN GALERÍA DE EXTRACCIÓN; (CENTRO) VISTA LATERAL DE DOZER; (DERECHA) VISTA EN PLANTA DE GALERÍA DE EXTRACCIÓN DOZER.	28
FIGURA 3.11. PANZER CONSTRUIDO PARA EL MODELO FÍSICO: (IZQUIERDA) VISTA EN PERSPECTIVA DE GALERÍA DE PRODUCCIÓN CON PANZER; (DERECHA) VISTA EN PLANTA DE PANZER.....	29
FIGURA 3.12. VISTA GENERAL DE ESTRUCTURA CONTENEDORA DE PLC Y PANELES ELÉCTRICOS DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA, ASÍ COMO ACTIVACIÓN DE PANZER	30
FIGURA 3.13. VISTA FRONTAL DE PLC EMPLEADO.....	30
FIGURA 3.14. ESQUEMA DE SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE MINERÍA CONTINUA	31
FIGURA 3.15. (IZQUIERDA) VISTA POSTERIOR DE MODELO FÍSICO CON PANEL DE ELECTRO-VÁLVULAS DE ACTIVACIÓN NEUMÁTICA DE DOZER. (DERECHA) DETALLE DE ELECTRO-VÁLVULA DE ACTIVACIÓN DE DOZER.....	31
FIGURA 3.16. ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO DOZER	31
FIGURA 3.17. PERFIL DE DOZER CON FIN DE CARRERA DE RETROCESO (DISPOSITIVO A LA DERECHA) INSTALADO EN MODELO FÍSICO.....	32
FIGURA 3.18. (IZQUIERDA) VISTA LATERAL DE MOTOR DE ACTIVACIÓN DE TRANSPORTADOR PANZER. (DERECHA) VISTA GENERAL DE MOTOR DE ACTIVACIÓN DE TRANSPORTADOR PANZER.....	32
FIGURA 3.19. ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE SENSADO	33
FIGURA 3.20. ESQUEMA DE POSICIÓN DE PUNTOS DE SENSADO DE SISTEMA SENSORIAL EN CALLE DE PRODUCCIÓN. VARIABLE x CORRESPONDE A LA DISTANCIA DESDE LA SALIDA DEL MATERIAL DEL SISTEMA (DESCARGA AL FINAL DEL PANZER O DESCARGA EN SIZER).....	33
FIGURA 3.21. SISTEMA DE SENSADO IMPLEMENTADO EN EL MODELO FÍSICO: (IZQUIERDA) VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE SENSADO; (DERECHA) VISTA EN PERSPECTIVA DE LA GALERÍA DE PRODUCCIÓN CON EL SISTEMA DE SENSADO	34
FIGURA 3.22. INTERFAZ DE USUARIO DE CONFIGURACIÓN Y CONTROL	35
FIGURA 3.23. (ARRIBA) INTERFAZ DE USUARIO MODELO DE CARGA; (ABAJO) INTERFAZ DE USUARIO DE MODELO DE CARGA CON DETALLE DE COMPONENTES.....	36
FIGURA 3.24. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA QUE CONSIDERA EL PRE-ACONDICIONAMIENTO, ALIMENTACIÓN A CHANCADOR SIZER (JRI, 2010). NOTACIÓN DE TAMAÑOS: F: FINOS, M: MEDIANOS; G: GRUESOS.	37
FIGURA 3.25. SECTOR AMERICANA SUR PMCHS: NIVEL 1 (COTA 1841 MSNM)-RANGOS DE FRAGMENTACIÓN SECUNDARIA PÓRFIDO ESTE POTÁSICO (PEK).....	38
FIGURA 3.26. MUESTRAS DE LAS GRANULOMETRÍAS UTILIZADAS: (IZQUIERDA) GRANULOMETRÍA G1, $D_{50}=15,9$ MM; (DERECHA) GRANULOMETRÍA G2, $D_{50}=19,4$ MM.....	39
FIGURA 3.27. GRANULOMETRÍAS IMPLEMENTADAS EN PRUEBAS EXPERIMENTALES Y AJUSTES DE ROSIN – RAMMLER MODELADOS	39
FIGURA 3.28. DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	40

FIGURA 4.1. COLGADURA PRESENCIADA EN EXPERIMENTO 2.1: (IZQUIERDA) VISTA DESDE COSTADO DE BATEA Y GALERÍA DOZER; (DERECHA) VISTA FRONTAL DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN.....	46
FIGURA 4.2. COLGADURAS EN PUNTOS DE EXTRACCIÓN: (IZQUIERDA) VISTA POSTERIOR DE COLGADURA A NIVEL DE BATEA EN PUNTO DE EXTRACCIÓN; (DERECHA) VISTA FRONTAL DE COLGADURA A NIVEL DE BATEA EN PUNTO DE EXTRACCIÓN	46
FIGURA 4.3. EVENTO DE ROCAS ESTABLES SOBRE CUÑAS INCLINADAS DEL PANZER	46
FIGURA 4.4. COLPAS O SOBRE-TAMAÑOS EN SISTEMA: (IZQUIERDA) COLPA A LA SALIDA DE UN PUNTO DE EXTRACCIÓN; (DERECHA) DESCARGA CON MATERIAL GRUESO.....	46
FIGURA 4.5. HISTOGRAMA DE DATOS DE LARGOS DE DESCARGA DOZER EN ESCALA REAL.....	47
FIGURA 4.6. HISTOGRAMA DE PRODUCTIVIDADES DE DOZER EN ESCALA REAL	47
FIGURA 4.7. LARGO DE DESCARGA EN PANZER	48
FIGURA 4.8. PLANTAS Y PERFILES DE DISTRIBUCIONES DEL MATERIAL PRESENCIADAS EN EXPERIMENTO 2.1: (1) DISTRIBUCIÓN CON MATERIAL UNIFORME; (2) DISTRIBUCIÓN SEGREGADA; (3) DISTRIBUCIÓN DILUIDA; (4) DISTRIBUCIÓN MIXTA	49
FIGURA 4.10. HISTOGRAMA DE DATOS DE LARGOS DE DESCARGA DOZER EN ESCALA REAL PARA EXPERIMENTO 2.2	51
FIGURA 4.11. HISTOGRAMA DE PRODUCTIVIDADES DE DOZER EN ESCALA REAL PARA EXPERIMENTO 2.2	51
FIGURA 4.12. (IZQUIERDA) VISTA EN PERSPECTIVA DE UN EJEMPLO DE MATERIAL INICIAL EMPLEADO EN PRUEBAS DE EXPERIMENTO 3; (DERECHA) VISTA LATERAL DE UN EJEMPLO DE MATERIAL INICIAL EMPLEADO EN PRUEBAS DE EXPERIMENTO 3.....	52
FIGURA 4.13. CASO CRÍTICO DE ALTURA ALCANZADA POR MATERIAL GRANULAR SOBRE PANZER: (IZQUIERDA) VISTA FRONTAL DE GALERÍA DOZER CON MATERIAL DESCARGADO; (DERECHA) VISTA EN PERSPECTIVA DE MATERIAL DESCARGADO. VALORES ENTRE PARÉNTESIS CORRESPONDEN A VALORES A ESCALA REAL	53
FIGURA 4.14. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO I: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	55
FIGURA 4.15. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO II: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	55
FIGURA 4.16. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE CONFIGURACIÓN PRINCIPAL TIPO III: TURNO A (DOZER EN VERDE) Y TURNO B (DOZER EN BLANCO).....	55
FIGURA 4.17. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA EL CÁLCULO DE LA UTILIZACIÓN	57
FIGURA 4.18. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE OPERACIÓN CON 5 DOZER SIMULTÁNEOS. DOZER EN VERDE INDICAN LOS DOZER OPERATIVOS DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS	61
FIGURA 4.19. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE OPERACIÓN CON 6 DOZER SIMULTÁNEOS. DOZER EN VERDE INDICAN LOS DOZER OPERATIVOS DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS	61

FIGURA 4.20. ESQUEMA DE VISTA EN PLANTA DE CALLE DE PRODUCCIÓN PANZER PARA CASO DE OPERACIÓN CON 7 DOZER SIMULTÁNEOS. DOZER EN VERDE INDICAN LOS DOZER OPERATIVOS DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS	61
FIGURA 4.21. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES DIARIAS DE PRUEBAS DE PILOTAJE PARA EXPERIMENTOS 4 A 7 DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA. D: DOZER.....	66
FIGURA 4.22. RESULTADOS DE UTILIZACIONES DIARIAS DE PRUEBAS DE PILOTAJE PARA EXPERIMENTOS 4 A 7 DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA. D: DOZER	66
FIGURA 5.1. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDADES DIARIAS DE PRUEBAS DE PILOTAJE PARA EXPERIMENTOS 1 A 4 DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA. D: DOZER	77
FIGURA 5.2. RESULTADOS DE UTILIZACIONES DIARIAS DE PRUEBAS DE PILOTAJE PARA EXPERIMENTOS 1 A 4 DE SISTEMA DE MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA. D: DOZER	77
FIGURA 6.1. VISUALIZACIÓN DE UTILIZACIONES DE PANZER EN FUNCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PARA AMBAS GRANULOMETRÍAS	82
FIGURA 6.2. RELACIÓN ENTRE UTILIZACIÓN MEDIA Y ESTIMADA POR MODELO DE REGRESIÓN	83

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Como consecuencia de la necesidad de aumentar las tasas de extracción en las minas subterráneas de Block/Panel Caving, la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) introduce el concepto de Minería Continua como una alternativa de solución por cuanto conforma una ruptura tecnológica en el diseño y operación de minas bajo esos métodos de extracción. Luego, resulta relevante poder sustentar las decisiones asociadas a su implementación y operación, por lo que se requiere en consecuencia el desarrollo de nuevos conocimientos orientados hacia tal sistema de extracción.

La nueva tecnología de Minería Continua ha dado espacio a la realización de diversos estudios sustentados en el uso de modelos físicos (Alvarez, 2010; Orellana, 2012) y numéricos (Orellana, 2011). En base a ellos, se ha concluido que es muy difícil capturar todos los condicionantes en torno al sistema de Block/Panel Caving a través de la modelación física. Tales restricciones hacen referencia a aspectos inherentes al método de explotación por Block/Panel Caving, como esfuerzos in-situ, esfuerzos inducidos, propagación de caving, dilución lateral, migración de finos, fragmentación secundaria, entre otros; aspectos que pueden ser de compleja representación vía un modelo a escala de laboratorio.

En la primera etapa de las investigaciones realizadas en torno al concepto de Minería Continua se estudió el comportamiento cinemático y la capacidad de extracción del sistema Dozer de la Minería Continua utilizando un modelo físico en dos dimensiones (2D) (Alvarez, 2010). En la segunda etapa, se construye un modelo físico en tres dimensiones (3D) (Orellana, 2012) a escala reducida con el objetivo de analizar la influencia de diversas variables de diseño en el comportamiento y la capacidad de extracción del sistema. Resulta relevante notar que en ambos modelos la extracción ha sido de manera aislada, considerando un único punto de extracción.

Debido a los buenos resultados mostrados en las pruebas experimentales mencionadas, nace la motivación del presente trabajo de investigación el cual busca, mediante pruebas de pilotaje, comprender el comportamiento y productividad del sistema de extracción Dozer – Panzer, así como su potencial automatización.

1.2 Objetivos de la Investigación

El objetivo principal del trabajo de tesis es establecer, a partir de experimentación a escala, los fundamentos de la planificación de extracción a corto plazo de la Minería Continua y sentar las bases para su potencial automatización.

Dentro de los objetivos específicos están:

- Construir un modelo físico de Minería Continua a escala de laboratorio.
- Caracterizar la interacción de los componentes de extracción Dozer – Panzer del sistema de Minería Continua.
- Determinar la productividad del sistema de Minería Continua bajo ciertas configuraciones de operación y fragmentación, así como para dos escenarios particulares: sin automatización y con automatización.

1.3 Justificación de la Investigación

Por más de una década, el conocimiento en torno al sistema de Minería Continua para minas de Block/Panel Caving se ha visto nutrido por diferentes estudios y pruebas experimentales. El desarrollo conjunto entre CODELCO a través de su filial el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2) y la empresa Deutsche Bergbau Technik (DBT)¹ de la prueba industrial en División Salvador entre los años 2006 y 2007, dio una primera aproximación del funcionamiento de los componentes de esta nueva tecnología: equipos Dozer Feeder y Panzer Feeder. Posterior a ello, CODELCO solicita al IM2 y Laboratorio de Block Caving del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile el desarrollo de tareas específicas con el propósito de ahondar en la comprensión del sistema de extracción continua.

Los últimos estudios fueron realizados empleando modelos físicos 2D y 3D para un punto de extracción aislado, con la finalidad de caracterizar la cinemática y productividad del componente Dozer, así como verificar la influencia de parámetros de diseño en el sistema minero de Minería Continua.

El presente trabajo involucra pruebas de pilotaje representativas de una calle de producción, la cual contiene ocho puntos de extracción con equipos Dozer Feeder. Lo anterior corresponde a un desafío en cuanto al aporte hacia el entendimiento del comportamiento e interacción de los componentes del sistema de Minería Continua, así como su potencial automatización mediante el sensado y control de los procesos. El trabajo pretende además proveer de lineamientos y principios basándose en los resultados productivos, operacionales y fenomenológicos que el modelo a escala, dentro de sus limitantes, permita reconocer y estudiar.

Dado que no existe un modelo a escala reducida conocido que haya intentado representar una calle de producción real del sistema de Minería Continua, se entiende como un aporte a la investigación científica la construcción de tal estructura y los resultados que a través de su utilización puedan surgir como base para la operación a escala de mina.

¹ Hoy adquirida por CATERPILLAR

1.4 Alcances de la Investigación

El presente trabajo de investigación pretende caracterizar la productividad del sistema de Minería Continua a través de experimentos controlados y sujetos a condiciones de fragmentación específicas. El modelo físico a escala reducida (1:50) empleado posee ocho (8) puntos de extracción y representa una calle de producción del módulo de Minería Continua a ser validado en División Andina de CODELCO. Se utilizan ocho (8) equipos Dozer a escala (uno por cada punto de extracción) y un (1) equipo Panzer extendiéndose a lo largo de la calle representada.

En cuanto a la automatización del sistema bajo estudio, se implementa un sistema de actuación compuesto por electro-válvulas, cilindros neumáticos y un motor trifásico, un sistema de sensado compuesto por cuatro (4) puntos de medición y un sistema de control.

1.5 Metodología

A continuación se plantean los pasos que conforman la metodología que permite dar cumplimiento al objetivo principal y objetivos específicos del trabajo de investigación:

1. Escalamiento. Se construye un modelo físico basado en los factores de escala emanados tras los estudios previos asociados a la Minería Continua, que simula ocho (8) equipos Dozer y un (1) equipo Panzer de la ingeniería desarrollada para el proyecto de Minería Continua.
2. Etapa de puesta en marcha y modificaciones. Se detectan las limitaciones de operación del sistema y qué aspectos de diseño deben cambiarse. Posteriormente se llevan a cabo las modificaciones pertinentes con el objetivo de resolver los problemas identificados y optimizar el funcionamiento del sistema.
3. Etapa de experimentación sin automatización: Sistema de Minería Continua (SMC). Se llevan a cabo pruebas que buscan caracterizar las descargas de los equipos Dozer, así como identificar configuraciones principales de operación y productividades asociadas.
4. Etapa de experimentación con automatización: Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA). Se desarrollan pruebas implementando un sistema de sensado en conjunto con un sistema de control. Se busca determinar el impacto de la automatización en la productividad del sistema de Minería Continua.
5. Etapa de conciliación de datos y análisis de resultados experimentales. Se contrastan los resultados obtenidos tras la realización de los experimentos. Se genera un análisis y propuesta de soluciones a los problemas que podría enfrentar el sistema en estudio, además de conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

1.6 Contenidos de la Tesis

Los contenidos del presente trabajo de tesis se esbozan a continuación:

Capítulo 1: Introducción. Se presenta la introducción, objetivos, justificación, alcances, metodología y contenidos de la tesis.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica. Se muestra una revisión crítica de los antecedentes disponibles en cuanto a la tecnología de Minería Continua y en relación a las pruebas realizadas tanto a nivel mina como laboratorio.

Capítulo 3: Metodología Experimental. Se describe el estado del modelo físico empleado, el cual es representativo de una calle de producción del módulo de Minería Continua a implementar en la División Andina de CODELCO; el diseño de los componentes Dozer y Panzer; la instrumentación y sistema de automatización implementados; el material de relleno utilizado así como las granulometrías empleadas en las pruebas de pilotaje y el procedimiento de trabajo general para el caso de las pruebas de pilotaje.

Capítulo 4: Pruebas de Pilotaje de la Minería Continua. Se detalla el plan experimental llevado a cabo en esta etapa sin automatización, así como los resultados emanados tras su realización.

Capítulo 5: Pruebas de Pilotaje de la Minería Continua Autónoma. Se muestran los principales resultados experimentales obtenidos al incorporar la automatización del sistema de Minería Continua.

Capítulo 6: Discusión y Análisis de Resultados. Se analizan los resultados del Capítulo 4 y 5, comparándolos con los de modelos anteriores. Se discute el comportamiento operacional, productivo y la automatización desarrollada en las pruebas de pilotaje. Finalmente, se entrega una evaluación del Sistema de Minería Continua.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones. Capítulo final con las conclusiones relevantes del estudio realizado, además de las recomendaciones para trabajos futuros ligados al estudio de la tecnología de Minería Continua.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introducción

La mecanización de las operaciones mineras explotadas mediante métodos de hundimiento tipo Block/Panel Caving se basó en la incorporación de equipos de carguío Load Haul Dump (LHD). Dicho escenario convencional es el que gobierna actualmente en la mayoría de las minas asociadas a tales modalidades, limitando las tasas de extracción medias a valores bajo 1 t/día/m².

La tecnología de Minería Continua propuesta por CODELCO surge como una alternativa al método convencional de extracción a través de equipos LHD en minas explotadas por métodos de Block/Panel Caving. Corresponde a una nueva opción extractiva que busca aumentar las tasas de producción vigentes, propósito asociado al incremento de los volúmenes de mineral futuros requeridos para satisfacer las metas productivas de la Corporación.

La primera prueba a escala industrial del sistema de Minería Continua corresponde a la efectuada en la División Salvador de CODELCO, prueba que terminó con resultados positivos por cuanto permitió comprobar el correcto funcionamiento de los equipos Dozer Feeder y Panzer Feeder. Posteriormente surgen nuevas pruebas, esta vez a escala de laboratorio y empleando materiales granulares, tratando de contribuir al conocimiento de los aspectos de diseño que rigen el comportamiento de esta tecnología.

En el desarrollo de este Capítulo se elabora una revisión crítica de la tecnología de Minería Continua y las pruebas llevadas a cabo para su validación y mejor comprensión.

2.2 Sistema de Minería Continua

La tecnología de Minería Continua corresponde a un concepto desarrollado de manera conjunta entre el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2) - filial de CODELCO Chile - y la Gerencia Corporativa Proyecto Minería Subterránea de CODELCO Chile, el que se desea aplicar en futuros yacimientos explotables mediante minería subterránea de hundimiento. Corresponde a una nueva opción extractiva que busca aumentar las tasas de producción actuales, propósito asociado al incremento de los volúmenes de mineral futuros requeridos para satisfacer las metas productivas de CODELCO.

2.2.1 Diseño

La Minería Continua es un diseño de explotación por hundimiento que considera la utilización de sistemas estacionarios de operación continua, para la extracción y para el manejo de materiales, de chancadores de bajo perfil, para la reducción del tamaño de colpas en el nivel de producción, y el acondicionamiento del macizo rocoso, para aplicar este método en mineral de

fragmentación gruesa. De esta manera, es posible lograr la producción simultánea de un conjunto de puntos de extracción de una misma galería, lo que conlleva a una mayor capacidad de producción por área de trabajo.

Un aspecto importante a considerar para el cumplimiento de las metas de la Minería Continua es la implementación de la mecanización y automatización, utilizando tecnología que permita materializar un sistema automático y remoto. Esto posibilita un sistema seguro, preciso, continuo y simultáneo, además de permitir manejar la mina desde el punto que se desee. La Figura 2.1 muestra un esquema general del sistema propuesto, donde cada punto de extracción cuenta con un equipo extractor Dozer.

Lara (2008), en el marco de su trabajo asociado al diseño del nivel de producción para un módulo genérico de Minería Continua a partir de observaciones de la operación del prototipo industrial (División Salvador), lleva a cabo simulaciones de la operación que tienen como objetivo determinar la cantidad de puntos de extracción necesarios para obtener la tasa de extracción esperada al utilizar el sistema de Minería Continua: mayor a 2 t/día/m^2 . Los resultados de tales simulaciones señalan que la cantidad de puntos de extracción necesarios para operar a tasas de extracción mayores a la esperada es de:

- 6 puntos, para sistema de manejo de materiales de 500 t/h
- 10 puntos, para sistema de manejo de materiales de 1.000 o 1.500 t/h
- 12 puntos, para sistema de manejo de materiales de 2.000 t/h

Cabe destacar que la cantidad de puntos de extracción se utiliza también para definir el largo del módulo de producción en cada escenario de capacidad productiva.

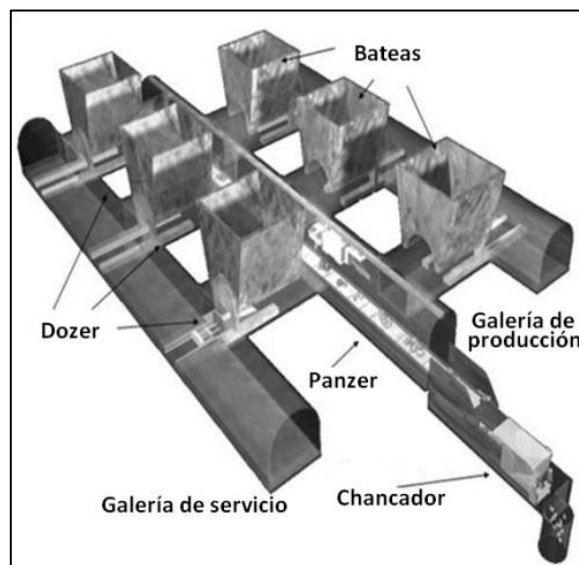


Figura 2.1. Esquema general del sistema de Minería Continua (Encina et al., 2008)

Las simulaciones efectuadas por Lara (2008) se rigieron por las variables y parámetros expuestos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Variables y parámetros de simulación para diseño de nivel de producción de Minería Continua (Lara, 2008)

Variables de simulación	Parámetros
▪ Rendimiento por ciclo de extractor: 8 t/ciclo	▪ Disponibilidad mecánica del módulo de 85,7%
▪ Tiempo ciclo extractor: 1,5 min/ciclo	▪ Distancia entre puntos: 15 m
▪ Frecuencia de bolones: 120 t/evento	▪ Se simula para 4, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 puntos de extracción
▪ Tiempo para reponer flujo	
▪ Rendimiento sistema manejo materiales	▪ Capacidades simuladas: 500, 1.000, 1.500 y 2.000 t/h

Los resultados de las simulaciones de Lara (2008) se detallan en las Tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2. Resultados simulados de tasas de extracción para diferentes productividades (Lara, 2008)

N° Puntos	Tasa extracción [t/día/m ²]			
	500 [t/h]	1.000 [t/h]	1.500 [t/h]	2.000 [t/h]
4	3,94	4,73	4,74	4,76
6	2,61	3,32	3,51	3,51
8	1,96	2,51	2,79	2,83
10	1,56	2,05	2,24	2,37
12	-	-	1,91	2,03
14	-	-	-	1,72
16	0,99	1,30	1,46	1,53
20	0,78	1,04	1,19	1,26

Tabla 2.3. Resultados de capacidades y rendimientos para simulaciones (Lara, 2008)

Capacidad [t/h]	N° máximo de puntos	Rendimiento Efectivo [t/h]	Rendimiento operacional [t/h]	Tasa extracción [t/día/m ²]
500	6	390,84	172,57	2,61
1.000	10	632,77	223,74	2,05
1.500	10	716,52	244,95	2,24
2.000	12	850,59	267	2,03

De acuerdo a los resultados de Lara (2008), se concluye que basta con 6 puntos de extracción y un sistema de 500 t/h de productividad para alcanzar la tasa de extracción esperada para la Minería Continua. Se identifica además el decaimiento en el rendimiento efectivo y operacional a medida que se incrementa el número de puntos de extracción, lo que se compensaría con capacidades productivas mayores. Es importante hacer notar que dentro de las simulaciones realizadas por Lara, el rendimiento por ciclo del extractor Dozer se mantuvo en 8 t/ciclo, omitiendo la variabilidad inherente del sistema que con estudios posteriores pudo ser constatada.

Otro de los resultados que destaca Lara (2008) corresponde a las ventajas y desventajas de los tipos de malla de extracción simulados: malla cuadrada y malla triangular (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de los tipos de malla evaluadas en simulaciones (Lara, 2008)

Tipo Malla	Ventajas	Desventajas
Cuadrada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desarrollos con TBM ▪ Uniformidad y facilidad de realizar excavaciones de producción y hundimiento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puntos frontales no pueden realizar el ciclo simultáneamente ▪ Pilares donde no hay influencia de elipsoides
Triangular	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Existen pilares menores provocados por elipsoides, lo cual mejora la recuperación ▪ Puntos frontales pueden realizar un ciclo simultáneo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construcción de desarrollos

Es posible identificar que la malla triangular es aquella que posee menores desventajas desde el punto de vista de la operación y estabilidad de labores. En efecto, como se verá más adelante en este capítulo, este tipo de malla es el que se implementará en División Andina de CODELCO en lo que se refiere a la prueba industrial a llevar a cabo en dicha División.

Tomando en consideración otros estudios y trabajos de investigación, al considerar un caso conservador, donde el extractor tiene la mitad de la capacidad de extracción de un equipo LHD (6 t) y si éste requiere el doble de tiempo para producirlo, la productividad del extractor Dozer será de aproximadamente 46 t/h por punto de extracción. De esta manera, el efecto combinado de todos los puntos de extracción trabajando simultáneamente a esa productividad otorga una tasa de extracción de aproximadamente 3 t/día/m², lo que equivale de 6 a 8 veces las tasas actuales (Carrasco et al., 2004). En este mismo contexto, para el sistema de Minería Continua se plantea que se debe disponer de tres módulos de producción en propagación, por cada uno que esté en etapa de régimen (Encina et al., 2008).

En el esquema descrito, los procesos de descuelgue de colgaduras y de reducción secundaria serían efectuados con tecnología convencional o con nuevas tecnologías que hoy se encuentran en desarrollo. Esto último es de suma relevancia, ya que para alcanzar las tasas de extracción propuestas es necesario garantizar un flujo de mineral lo más constante posible, reduciendo así el tiempo transcurrido para la solución de las interferencias operacionales mencionadas.

Adicionalmente, se plantea que si cualquier punto de extracción presenta colgadura durante la operación, permanecerá en ese estado hasta el siguiente turno cuando el equipo de producción entre a la mina a reactivar el flujo, lo mismo si un extractor u otro equipo se detienen o dañan (Carrasco et al., 2004).

La configuración del manejo de materiales, basada en equipos estacionarios automatizados, permite que un sistema de control experto maneje el funcionamiento del sistema en cada una de sus etapas. De esta manera, se evitaría la exposición de personal a los riesgos de la faena y se lograrían mejoras substanciales desde el punto de vista del rendimiento de los equipos, dado que se estaría disminuyendo la incertidumbre inherente a la operación humana.

2.2.2 Productividad

Carrasco et al. (2004), enfatizó el impacto de la Minería Continua en el rendimiento de la producción contrastándolo con un sistema LHD. Bajo ciertos criterios de diseño se deducía un importante incremento en la producción por frente con Minería Continua, sin un incremento proporcional del área activa requerida. Además, se evidenciaba un descenso substancial en el tiempo requerido para alcanzar la producción en régimen (ramp up) en Minería Continua comparado con el sistema convencional LHD, pudiendo tener un gran efecto en el VAN de ser aplicado en una mina nueva. Esto último se justifica debido a que, al adelantarse en el tiempo, los flujos de caja generados por una producción en estado de régimen sufrirían menores descuentos, contribuyendo a un incremento del VAN.

Encina et al. (2008) señala que los requerimientos de producción pueden ser calculados para sólo una calle de producción donde cuatro puntos de extracción están a una tasa de extracción en régimen y 12 puntos de extracción están a una tasa de extracción de propagación. Asumiendo una malla de extracción de 15 m x 15 m, cada punto de extracción cubre 225 m², por lo que el área activa total por calle de producción es de 3.600 m². Luego, la producción por calle sería de (asumiendo una tasa de extracción de 0,45 t/día/m² en propagación y 4,05 t/día/m² en régimen):

$$\text{Producción por calle} = 4 * 225 * 4,05 + 12 * 225 * 0,45 = 3.645 + 1.215 = 4.860 \text{ t/día}$$

Lo anterior sólo tendría validez para un análisis por módulos, es decir, por calle de producción. Desde el punto de vista del concepto de Minería Continua como sistema de extracción una calle corresponde a una unidad muy pequeña, pudiendo desencadenarse problemas de dilución lateral.

El desarrollo del trabajo planteado por Encina et al. (2008) considera un 50% de disponibilidad de todo el sistema, habiendo sólo 12 horas operativas al día. El resto del tiempo sería dedicado a reducción secundaria, mantención y reparación, entre otros. Por otra parte, la malla escogida para el cálculo posee los puntos de extracción enfrentados, por lo que no es posible trabajar con ellos simultáneamente. De esta manera, se consideran sólo seis horas efectivas por día para los Dozer. Luego, en la etapa en régimen, el Dozer tendría una capacidad media de producción de:

$$\text{Capacidad productiva Dozer} = 3.645/4 = 911 \text{ t/día} = 911/6 = 152 \text{ t/h}$$

Por otro lado, siguiendo el mismo criterio, la capacidad promedio requerida para el transportador y el chancador es:

$$\text{Capacidad productiva transportador y chancador} = 4.860/12 = 405 \text{ t/h}$$

Finalmente, se plantea que los requerimientos productivos para Minería Continua son perfectamente alcanzables, ya que pruebas llevadas a cabo para el Dozer arrojaron una productividad media de 200 t/h y de la experiencia de la empresa Deutsche Bergbau Technik (DBT) con transportadores de cadena y chancadores en roca dura muestran resultados por sobre las 500 t/h.

2.2.3 Equipos

Los principales componentes del sistema de Minería Continua son tres: Dozer, equipo consistente en una placa fija y una móvil que empuja el mineral hacia la calle de producción desde el punto de extracción; Panzer, concerniente a un equipo de transporte por principio de arrastre conformado por cadenas y barras de acero; y Chancador, el cual puede variar dependiendo del principio de trituración: impacto (Roll Crusher) o tracción y cizalle (Sizer). El chancador Roll Crusher fue probado en División Salvador en la primera prueba industrial de la tecnología de Minería Continua (años 2007-2008), con resultados que no estaban al nivel de lo esperado. En base a esto, el chancador Sizer fue probado en Andina y validado para ser implementado en la nueva prueba industrial, esta vez en División Andina. A continuación se plantea el diseño y las características de cada uno de los equipos de esta tecnología.

2.2.3.1 Dozer

El equipo Dozer corresponde a un extractor compuesto por dos placas: una fija y una móvil. Se ubica bajo el punto de extracción y tiene la capacidad de ser removido del lugar desde las galerías de servicio del nivel de producción de Minería Continua. Esta última característica permite evitar daños al equipo al descolgar puntos de extracción con explosivos.

El sistema de extracción difiere del caso LHD, debido a que la extracción mediante Dozer se basa en una perturbación de la columna de material desde el fondo, al contrario de lo que realiza el LHD removiendo únicamente la lámina de material superficial que la pala y su penetración en la pila de material permiten capturar.

Junto a lo anterior, el sistema de accionamiento de los Dozer es de tipo hidráulico, permitiendo reducir los requerimientos asociados a caudales de aire limpio. La Figura 2.2 muestra un esquema del equipo Dozer.

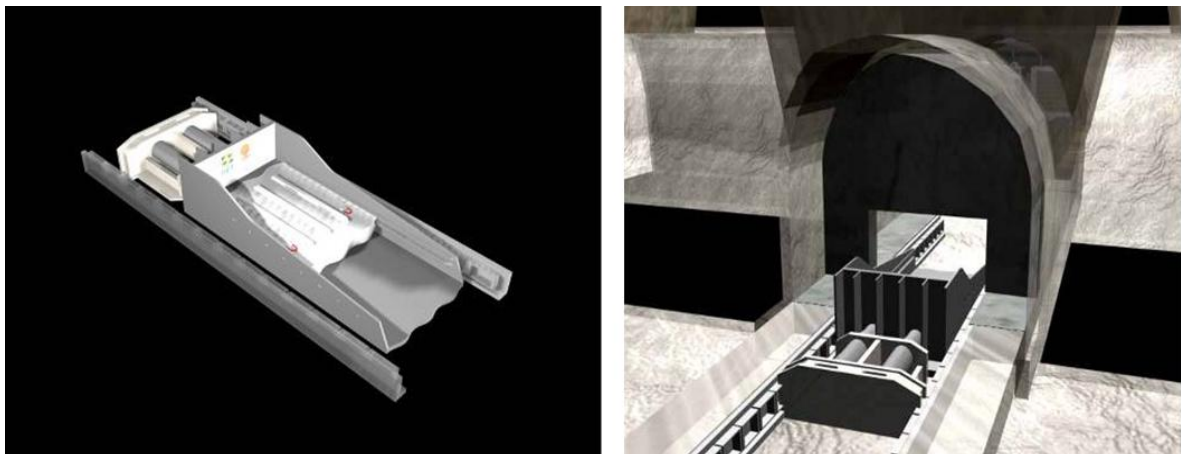


Figura 2.2. Esquema de Dozer: (Izquierda) Vista isométrica de Dozer y placas que lo componen; (Derecha) Vista posterior del Dozer ubicado en un punto de extracción (JRI, 2010)

2.2.3.2 Panzer

El equipo Panzer o transportador de cadena basa su funcionamiento en el movimiento de placas verticales que se desplazan sobre una base horizontal por medio del arrastre de cadenas que sujetan las placas verticales en sus extremos. De esta forma, el material que queda entre placa y placa se desplaza junto con estas, logrando la transferencia de la carga desde el punto de alimentación hasta la descarga en la cabeza del equipo.

El arrastre de las cadenas se realiza por medio del conjunto: motor, reductor y eje dentado (“sprocket”) para acople con cadena (JRI, 2010).

En la Figuras 2.3 y 2.4 se muestra un equipo Panzer instalado.



Figura 2.3. Panzer



Figura 2.4. Cadenas del Panzer

El principio de funcionamiento del Panzer es el arrastre. El material alimentado por los Dozer se acumula sobre la placa base del Panzer, las placas de arrastre dispuestas sobre la placa base se mueven paralelas entre sí y con la dirección de avance en el sentido de arrastre de las dos cadenas laterales.

Las placas de arrastre están unidas en sus extremos a las cadenas laterales, las que a su vez son acopladas a un sprocket de cabeza que gira por la acción de un conjunto motor-reductor, esto permite que el movimiento de las cadenas en la dirección de la cabeza del equipo, empuje de manera continua las placas de arrastre.

La placa base del Panzer no genera ningún tipo de movimiento, sólo es el soporte del mineral que se arrastra sobre ella.

JRI (2010) plantea como principales ventajas del transportador Panzer respecto de otros transportadores su requerimiento de espacio (equipo compacto tanto en altura como en ancho), que es un sistema probado y su resistencia al impacto. Asimismo, las desventajas más relevantes que presenta son el desgaste de las planchas inferiores y laterales (debido al arrastre del material), el reemplazo de partes (cadenas son propensas a cortes) y el consumo eléctrico (potencia consumida por el equipo es alta debido a su principio de arrastre).

2.2.3.3 Sizer

El componente triturador a aplicar en División Andina para la prueba industrial de validación de tecnología de Minería Continua corresponde al chancador Sizer (Figura 2.5). Este equipo está formado por rodillos dentados, que rodando en sentido opuesto fragmentan la roca a través de los efectos de tracción y cizalle.



Figura 2.5. Chancador tipo Sizer

En cuanto a la evaluación del equipo para su aplicación en Andina, JRI (2010) plantea las siguientes bases de diseño principales:

- Capacidad de tratamiento : 21.600 t/día
- Horas/ día : 16
- Setting Chancador : 250 – 300 mm
- Separación directa de fino/grueso : 50 % setting
- Humedad Mineral : 3,0 – 5,0 %

Asociado a la disponibilidad del Sizer, en condiciones de mantención preventiva y programada del equipo, se considera mayor o igual a 90%.

De la ingeniería desarrollada por JRI (2010) se tiene que el rendimiento instantáneo del equipo de trituración se encuentra alrededor de las 1.700 t/h, con resultados levemente mejores en el caso de utilizar un tamaño crítico de 1,8 m.

Los rendimientos obtenidos son consistentes con los resultados de las pruebas realizadas en Andina, que bordean valores nominales de 1.797 t/h y máximos de 2.276 t/h, lo anterior influenciado directamente por la granulometría de la alimentación.

2.3 Pruebas del Sistema de Minería Continua

2.3.1 Pruebas a Escala Industrial

2.3.1.1 División Salvador de CODELCO

La prueba a escala industrial en División Salvador de CODELCO correspondió a una prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua en la Mina El Salvador desde marzo 2007 a enero 2009 (Figura 2.6).

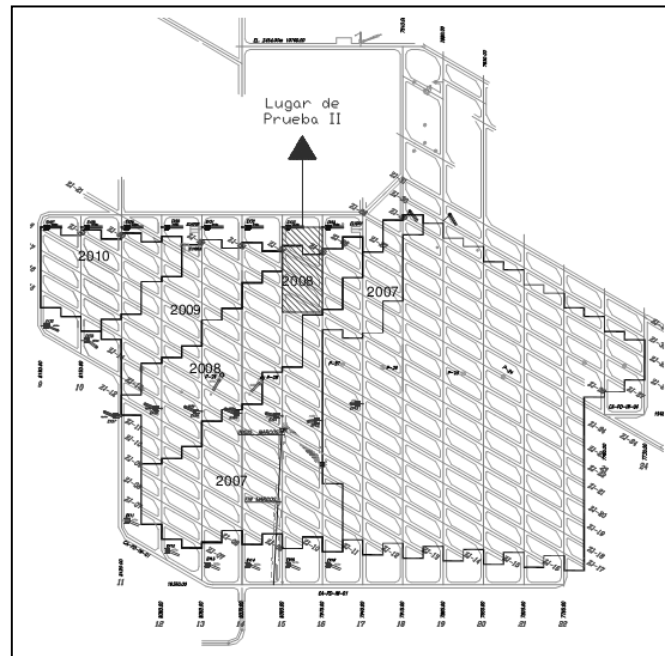


Figura 2.6. Ubicación de la prueba industrial en El Salvador-Inca Oeste

Las condiciones de evaluación consideraron un módulo con las siguientes características:

- Cuatro puntos de extracción, cada uno con un área de influencia teórica de 195 m^2 ($13 \text{ m} \times 15 \text{ m}$) y con un equipo Dozer.
- Una estación central de accionamiento hidráulico para la alimentación de aceite a los Dozer. El circuito hidráulico tiene su base de energía en dos bombas que entregan un máximo de 400 bar, cada bomba es impulsada por un motor eléctrico de 200 kw con 1.485 l/min.
- Un equipo Panzer con su estación de retorno y cabezal motriz con dos motores de 75 kW.
- Un chancador tipo “Roll crusher” modelo SB 1518 con alimentación máxima de 1.800 mm x 1.800 mm y setting de descarga de 300 mm.
- Un transportador de correas de 1.200 mm de ancho.
- Un sistema de comando y de registro de datos de procesos.
- Una subestación eléctrica dedicada.
- Una superficie basal de alrededor de 800 m^2 y una altura de columna de mineral de 200 m.

- El nivel de producción consistió de una calle de servicio de 4,3 m de ancho x 3,8 m de alto, una calle de producción donde se instaló el Panzer de 3 m de ancho x 5,2 m de alto y una galería de 4 x 4 m² en la cual se dispuso el equipo Dozer.
- La caverna para la estación de chancado y transferencia era de aproximadamente 13 m de largo x 6 m de ancho x 7,2 m de alto.

Los resultados de esta prueba demuestran un funcionamiento adecuado del sistema de Minería Continua, en especial de los equipos Dozer y Panzer. Queda por resolver el efecto de las variables de diseño pendientes y el efecto sobre los índices operacionales del sistema. De forma anexa, para un funcionamiento simultáneo de varios Dozer es necesario repotenciar el sistema hidráulico instalado, o en su defecto instalar un conjunto de creación hidráulica para máximo dos Dozer, lo que independiza el funcionamiento de un par de Dozer.

Resultados en torno a la producción y el rendimiento indicaron que el mineral transportado por el sistema llegó a 132.390 toneladas, de las cuales 122.120 toneladas fueron extraídas mediante la operación de Dozer Feeder y 10.270 toneladas con equipos LHD. El rendimiento del sistema como conjunto varió entre 150 y 400 t/h efectiva, con un promedio final de prueba de 195 t/h efectiva. La Figura 2.7 muestra una vista del módulo en funcionamiento.

En cuanto a la evaluación de la operación de los equipos, se tiene que el equipo Dozer presentaba vulnerabilidad desde el punto de vista de la contaminación con polvos de los cilindros hidráulicos (IM2, 2007).

En relación al funcionamiento combinado durante la realización de estas pruebas, se observó que el sistema hidráulico no permitió la operación de dos Dozer en forma simultánea. El ciclo de un Dozer se pudo realizar solamente cuando el ciclo del otro Dozer ya había finalizado, lo que corresponde a una operación individual alternada.



Figura 2.7. Prueba de funcionamiento de Minería Continua en El Salvador

Asociado al equipo Panzer, la disponibilidad estimada para este componente fue de un 95 – 98%.

La velocidad de operación del Panzer fue de 11 m/min, constante, y sólo se veía afectada cuando el chancador se saturaba con colpas de sobre-tamaño. De acuerdo a esta condición, la productividad del Panzer es variable y depende de la cantidad y continuidad del mineral alimentado por los Dozer y de la capacidad de recepción que tiene el chancador.

En las pruebas realizadas con el equipo transportador Panzer saturado, es decir, cuando el equipo fue alimentado en forma constante, se registraron rendimientos efectivos de hasta 700 t/h y rendimientos puntuales por sobre las 1.000 t/h cuando el tamaño del mineral fue favorable para el chancador.

Se pudo verificar también que el equipo Panzer es capaz de transportar bolones de hasta 2,5 m de longitud mayor y que es capaz de partir sin problemas con carga completa a lo largo de toda su extensión (alrededor de 80 toneladas).

La Figura 2.8 muestra los equipos Dozer y Panzer instalados en el módulo de la prueba llevada a cabo en División Salvador.



Figura 2.8. Dozer (Izquierda) y Panzer (Derecha) instalados en División Salvador

El diseño de la prueba para el chancador de bajo perfil del tipo “impact roll crusher” contemplaba rendimientos efectivos de 720 t/h, con una razón de reducción máxima de 1:4,5. El rendimiento del equipo depende fuertemente de la granulometría de alimentación y se lograron rendimientos efectivos entre 300 t/h y 630 t/h, dependiendo de los tamaños procesados.

En esta prueba, el chancador resultó ser la unidad crítica del sistema de manejo de materiales, debido principalmente al tiempo de reducción de colpas grandes y a la baja disponibilidad asociada principalmente al ajuste o recambio de elementos de desgaste.

En general, el estudio IM2 – CODELCO concluyó que el chancador tipo impacto no satisface los requerimientos de la Minería Continua, principalmente por no alcanzar la disponibilidad necesaria. En base a esto último, la disponibilidad estimada del chancador Roll impact fue de 80-85%. Valores de disponibilidad del chancador Sizer probado en Andina arrojaron datos promedio de disponibilidad de alrededor de un 90%, razón por la cual se empleará ese tipo de chancador en las pruebas que se llevarán a cabo en División Andina.

2.3.1.2 División Andina de CODELCO

Es de esperar que a finales del año 2014 – inicios del año 2015, se inicie la prueba industrial de validación del sistema de Minería Continua. Ésta será emplazada en el área Noroeste de la actual disposición general del Tercer Panel del Nivel 16 de Producción de la mina Río Blanco de la División Andina de CODELCO (Figura 2.9).

El bloque de Minería Continua considera un área total de 6.851 m² (31 puntos de extracción con una malla de 13 x 17 m² alternada) y una altura de columna de roca promedio a extraer de 335 m, compuesta en promedio de 160 m en roca primaria, con un tonelaje total de 5,7 Mt, ley media de 0,75% Cu, de las cuales el 97% tiene categoría de reservas medidas.

El alcance de la prueba industrial considera todos los componentes del proceso productivo identificados para Minería Continua con Dozer-Panzer-Sizer, la cual demandará la construcción de infraestructura requerida para la operación, atendiendo entre otras cosas:

- Un bloque de Minería Continua el cual se ha definido con cuatro calles de producción, una de ellas con siete puntos de extracción, mientras que las restantes, con ocho.
- Se considera un nivel de producción ubicado en la elevación 3.236 msnm a 15 m debajo del nivel de hundimiento, consistente en galerías espaciadas cada 13 m las cuales servirán de galerías de servicio y producción alternadamente.
- La prueba deberá utilizar toda la infraestructura disponible en el Tercer Panel (barrio cívico, servicios, talleres, accesos principales, etc.).

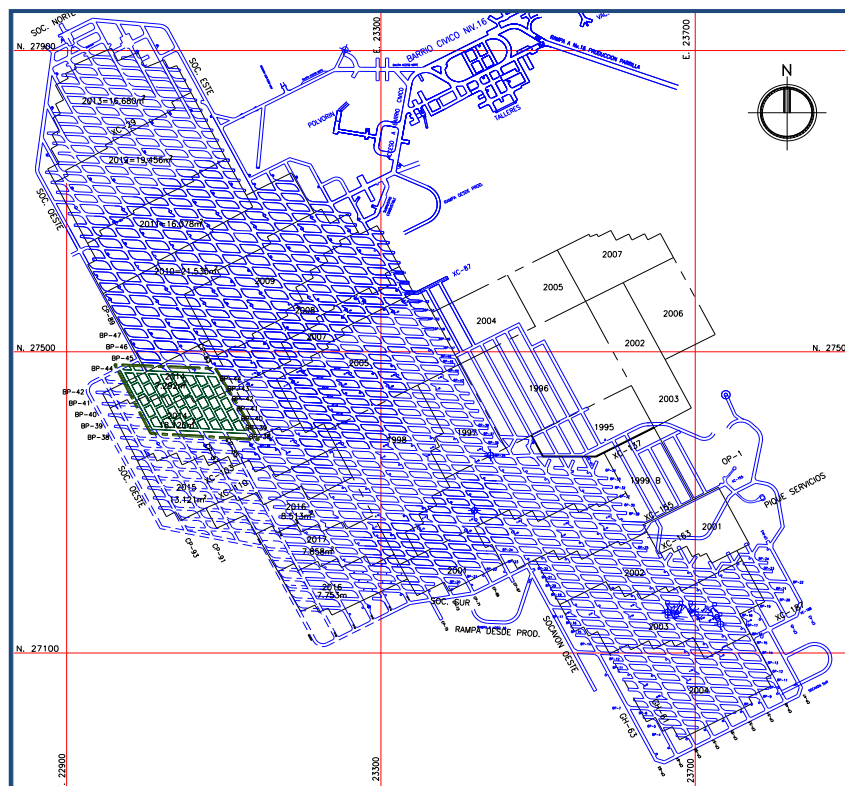


Figura 2.9. Ubicación Módulo Minería Continua de Validación en Tercer Panel, División Andina

Las galerías de servicio del módulo se utilizan para acceder a los equipos Dozer Feeder y a los puntos de extracción, para realizar ahí operaciones de mantenimiento y descolgadura. Las galerías de producción tienen como finalidad la extracción de mineral desde las zanjas o bateas receptoras. El mineral será extraído desde los puntos de extracción mediante equipos Dozer, para posteriormente ser acarreado por un transportador continuo tipo Panzer, el cual descargará en un chancador de bajo perfil tipo Sizer (Figuras 2.10 y 2.11).

JRI (2010) establece que las bases generales para el diseño minero deben, como mínimo, cumplir los siguientes factores de éxito:

- Velocidad de Extracción en Régimen $> 3 \text{ t/día/m}^2$.
- Opex $< 80\%$ Opex Método Convencional.
- Dotación $< 70\%$ Método Convencional.
- El tiempo para alcanzar el estado de régimen debe ser menor al 75% del tiempo en alcanzar este estado con el método convencional.
- El área activa debe ser menor al 64% del área activa del método convencional, para una producción equivalente.

Luego, considerando que este trabajo de investigación busca replicar una calle de producción del módulo a implementar en esta prueba industrial, se establece como valor de producción objetivo de las pruebas de pilotaje el cumplimiento de la velocidad de extracción en régimen de 3 t/día/m^2 .

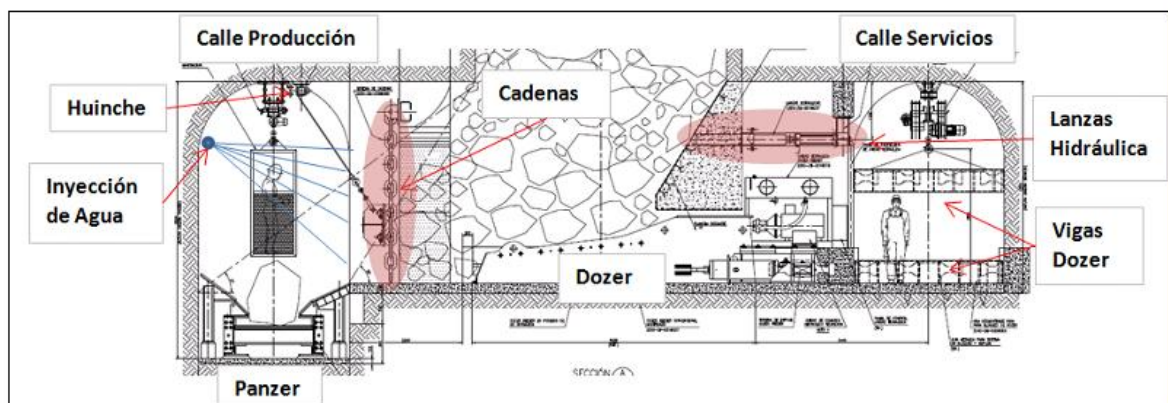


Figura 2.10. Detalle de equipos en sector Dozer/Panzer (JRI, 2010)

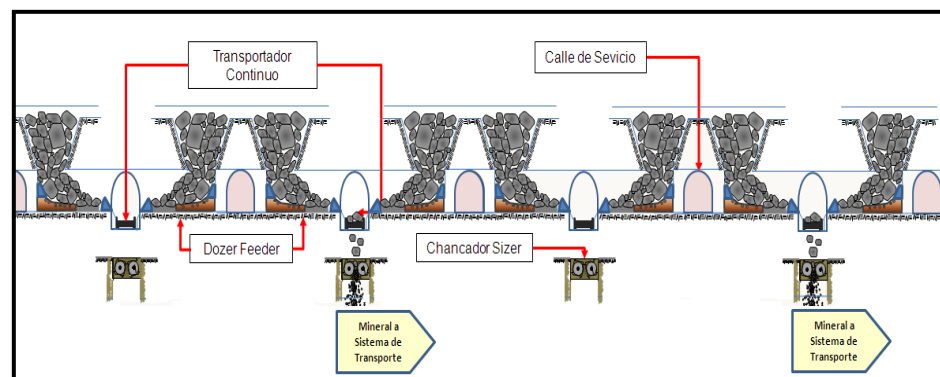


Figura 2.11. Esquema de perfil de módulo de Minería Continua a implementar en División Andina (JRI, 2010)

En cuanto al nivel de producción, se tiene que las dimensiones de la unidad de extracción deben ser iguales al diseño convencional definido por División Andina, esto es, 13 m x 17 m. Además, la viga monorriel ubicada sobre el Panzer deberá ser capaz de soportar cinco toneladas, esto con el fin de realizar montaje, inspección, reparación y reanudación de flujos.

2.3.2 Pruebas a Escala Laboratorio

2.3.2.1 Proyecto Modelación Física Minería Continua

En el año 2010, el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile acuerda con el IM2 un protocolo de trabajo de investigación en torno al establecimiento de los fundamentos teóricos del sistema de Minería Continua.

El estudio tenía por objetivo principal el modelamiento del flujo gravitacional asociado a la extracción continua a través de un punto de extracción y un equipo extractor continuo, desarrollado en un modelo 2D y utilizando grava como material fragmentado (Alvarez, 2010).

Entre los principales resultados se concluyó que el modelo físico logra reproducir la cinemática del sistema pero no así la dinámica del fenómeno, esto es, las fuerzas requeridas por el sistema de extracción Dozer relativas al empuje sobre la pila de material. Luego, se logran establecer similitudes entre tipo de colgaduras, productividades y tiempos de ciclo.

Respecto de las colgaduras, se observa una alta frecuencia de ellas por lo que se recomienda la evaluación de alternativas de descuelgue automatizadas que permitan que el proceso de extracción sea efectivamente continuo.

La Figura 2.12 muestra el modelo físico empleado en este proyecto.

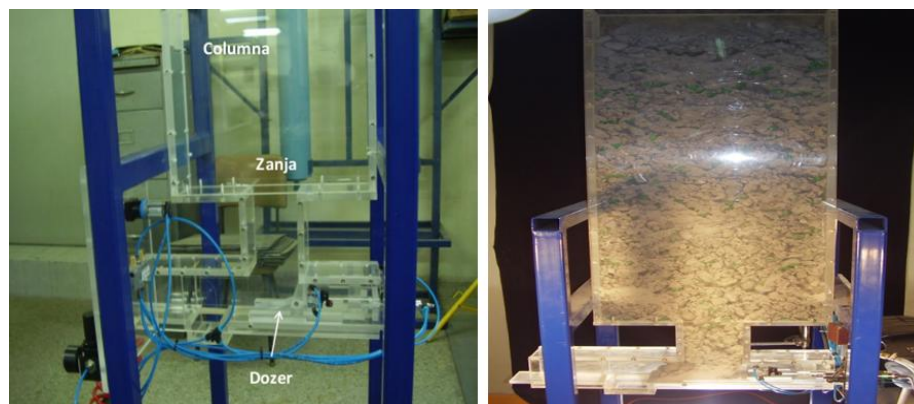


Figura 2.12. Modelo físico 2D Proyecto Modelación Física Minería Continua: (Izquierda) Perfil de modelo sin material; (Derecha) Perfil de modelo cargado con grava

Como ha podido ser apreciado anteriormente, esta etapa de modelación consideró únicamente un punto de extracción aislado. Luego, se evidencia la necesidad de la generación de conocimiento entorno al comportamiento y productividad del sistema Dozer – Panzer, esta vez incluyendo un número de puntos de extracción equivalente a los que componen una calle de producción Panzer.

2.3.2.2 *Modelación Numérica Minería Continua*

Una segunda etapa de esta investigación corresponde a la “Modelación numérica de la Minería Continua” (Orellana, 2011) donde el objetivo principal es establecer una metodología de estudio de flujo gravitacional que integre la modelación numérica de elementos discretos y la experimentación física, para ser utilizada como herramienta de apoyo a la ingeniería.

Entre las principales conclusiones del trabajo se puede señalar que la similitud dinámica del modelo a escala laboratorio, que no es capaz de lograr la modelación física, es alcanzada por la modelación numérica, por lo tanto, las herramientas en este caso serían complementarias. De esta forma los modelos físicos permiten estudiar la productividad sujeta a cambios en el sistema y los modelos numéricos permiten estudiar las fuerzas presentes en el medio y sobre los equipos.

La Figura 2.13 ilustra una de las simulaciones llevadas a cabo por Orellana (2011) con respecto al modelo físico 2D utilizado por Alvarez (2010).

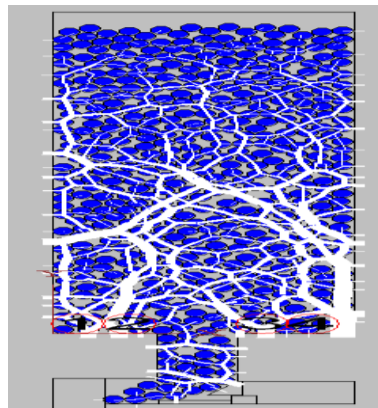


Figura 2.13. Perfil de modelación numérica de Minería Continua

La modelación numérica llevada a cabo por Orellana (2011) permitió entender la dinámica gobernante en el sistema de Minería Continua, complementándose con los resultados obtenidos a través del modelo físico 2D (Alvarez, 2010). Pese a lo anterior, se carece de un entendimiento de la interacción entre varios puntos de extracción, por lo que nuevamente se justifica y hace necesario la realización de experimentos que evalúen un sistema contemplando más de un punto de extracción.

2.3.2.3 *Proyecto Modelación Física Minería Continua Fase 2.0*

Con motivo de la prueba industrial a desarrollar en la División Andina de CODELCO, IM2 y el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile desarrollaron una segunda etapa de modelación física. Ésta contempló la evaluación del sistema de Minería Continua en un modelo a escala laboratorio tipo 3D axisimétrico (Figura 2.14) con grava como material fragmentado que permitiera aportar en la evaluación tanto cualitativa como cuantitativa de la nueva prueba, y los resultados esperados respecto de las nuevas variables de diseño a considerar. En él se consideró evaluar el efecto de: Granulometría, Secciones de galería (se modifica altura de la galería), Ángulo de batea, Distancia hacia el punto de vaciado del Dozer, Diseño de equipos

Dozer y Sistema de descuelgue. Además, y con el objetivo de establecer el efecto sobre productividad, cinemática y colgaduras, se realizó un análisis cualitativo del diseño del sistema de descuelgue automatizado propuesto y se buscó verificar el cumplimiento de la similitud dinámica de la modelación en laboratorio de la tecnología de Minería Continua a través de materiales granulares equivalentes o tipo roca.

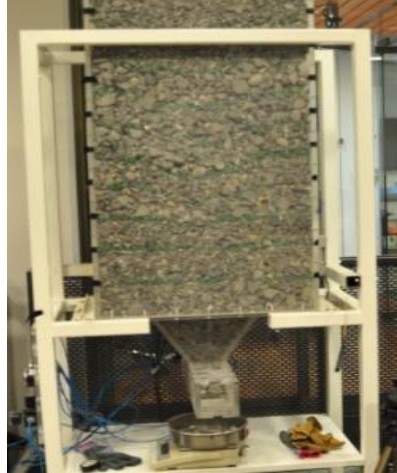


Figura 2.14. Modelo físico 3D empleado en Proyecto Modelación Física Minería Continua Fase 2.0

En cuanto a los resultados experimentales de este trabajo se tiene que:

- Se observó, con una granulometría G1 ($d_{50} = 0,9$ m), que una disminución de la sección de la galería en 27%, implica una reducción de la tasa de extracción media del 39%.
- Un equipo Dozer de superficie frontal mayor en un 27%, aumenta la productividad del sistema en torno al 30%.
- Un acortamiento de un metro de la distancia entre la calle de producción y el punto de extracción, eleva la tasa en un 69% respecto del caso base.
- En relación a los esfuerzos, se identificó el efecto de arco presente en la sección transversal del modelo, el cual se manifiesta con una reducción de los esfuerzos verticales sobre el Dozer con el consecuente aumento de aquellos esfuerzos horizontales en la pared perpendicular a dicha sección, todo esto una vez comenzada la extracción.
- En cuanto al estudio de las líneas de flujo, se identifica que la geometría de la zona de extracción corresponde a un elipsoide, el cual tiene el eje de simetría en la mitad de la zanja al igual que en lo observado durante la experimentación 2D.
- Asociado a las colgaduras, los efectos de la resistencia de los fragmentos, la infraestructura minera y la granulometría predominan por sobre el efecto de la carga vertical observada. La relación UCS/esfuerzo principal, se encuentra fuera de los rangos observados en la minería de caving actual.
- De la similitud dinámica buscada a través de la fuerza de empuje del equipo Dozer, ninguno de los materiales considerados permitió establecerla a la escala empleada (1:50).

Mediante las pruebas realizadas por Orellana (2012) se obtienen resultados interesantes desde el punto de vista del diseño del sistema de Minería Continua y de la productividad que el sistema

puede alcanzar variando tanto la sección de la galería Dozer, el ancho del Dozer o bien la distancia entre la calle de producción y el punto de extracción. Se concluye que se debe profundizar el estudio, esta vez, para un sistema conteniendo una cantidad mayor de puntos de extracción y verificando si la interacción entre los Dozer y el Panzer permitiría un correcto funcionamiento del sistema. En este trabajo de tesis, el autor plantea un estudio netamente centrado a la productividad del sistema de Minería Continua, evaluando los efectos de su automatización.

2.3.2.4 Fundamentos Operacionales, Productivos y de Automatización del Sistema de Minería Continua

La tesis aquí presentada nace de la necesidad de conocer y entender la interacción entre los componentes Dozer y Panzer del sistema de Minería Continua. Hasta el momento, los trabajos realizados en torno a esta tecnología han empleado un único punto de extracción, limitando los estudios a la productividad de un Dozer aislado.

Mediante este trabajo se propone comprender el funcionamiento del sistema Dozer – Panzer, así como cuantificar el potencial productivo que alcanza el sistema bajo condiciones de fragmentación y operación específicas. Se busca corroborar si es que son alcanzadas las velocidades de extracción consideradas como factor de éxito de la prueba industrial, así como también cuantificar el impacto de una granulometría más gruesa a la esperada en dicha prueba. Respecto de las restricciones operacionales, se limita inicialmente el estudio al escenario que presentará efectivamente la prueba en División Andina, esto es, máximo de cuatro Dozer operativos simultáneos por calle de producción; posteriormente se libera dicha restricción, estudiando la sensibilidad de la productividad y utilización del sistema una vez se emplea un número mayor de Dozer.

2.4 Conclusiones

Las principales conclusiones realizadas a partir de la revisión bibliográfica de la iniciativa de extracción de Minería Continua son:

1. Dentro de la revisión bibliográfica efectuada, se identifica que para el cumplimiento de las metas de la Minería Continua resulta importante la implementación de la mecanización y automatización, utilizando tecnología que permita materializar un sistema automático y remoto. Posteriormente, en el Capítulo 5 de esta tesis, se evalúa el sistema de Minería Continua incorporando automatización.
2. De acuerdo a los resultados de Lara (2008), se concluye que basta con 6 puntos de extracción y un sistema de 500 t/h de productividad para alcanzar tasas de extracción superiores a 2 t/día/m². Las simulaciones llevadas a cabo por Lara (2008) no consideraron una variabilidad en la productividad de los Dozer, por lo que se concluye la relevancia de comprobar el cumplimiento de sus resultados mediante pruebas de pilotaje.

3. Sólo se dispone de estimaciones teóricas (Carrasco et al., 2004; Encina et al., 2008) y simulaciones (Lara, 2008) de las productividades que podría alcanzar el sistema de Minería Continua. Luego, se carece de conocimiento asociado a las tasas productivas que el sistema podría alcanzar tanto para el caso sin automatización como para un escenario incorporando automatización, por lo que se torna relevante el desarrollo del presente estudio.
4. Considerando que este trabajo de investigación busca replicar una calle de producción del módulo a implementar en la prueba industrial de División Andina, se establece como valor de producción objetivo de las pruebas de pilotaje el cumplimiento de la velocidad de extracción de 3 t/día/m².
5. La modelación física asociada a la Minería Continua se ha limitado al estudio de un Dozer aislado. Luego, se desconoce la interacción Dozer – Panzer y las consecuencias que dicho comportamiento tenga sobre la productividad y secuenciamiento del sistema, justificando de esta manera la realización de pruebas de pilotaje representativas de una calle de producción.

A partir de los alcances expuestos y dentro del marco de la presente investigación, la Tabla 2.5 despliega las inquietudes y el capítulo-sección donde, a través de pruebas de pilotaje, son resueltas.

Tabla 2.5. Preguntas a resolver en trabajo de tesis

Pregunta	Resolución
¿Es posible alcanzar las velocidades de extracción de la Minería Continua?	Capítulo 4 – Experimentos 4 a 7
¿Es posible descargar sobre material ya disponible en el Panzer (Panzer semi-lleno a lleno)?	Capítulo 4 – Experimento 3
¿Cuál es el efecto de la granulometría?	Capítulo 4 – Experimentos 4 a 7 Capítulo 5 – Experimentos 1 a 4
¿Cuál es el efecto de la estrategia de descuelgue de zanjas?	Capítulo 4 – Experimentos 4 a 7 Capítulo 5 – Experimentos 1 a 4
¿Cuál sería el modo de operación de la Minería Continua?	Capítulo 4 – Experimento 4
¿Cuál sería el impacto de la automatización en la productividad de la Minería Continua?	Capítulo 5 – Experimentos 1 a 4

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este Capítulo se detalla la metodología experimental a utilizar, explicitando las consideraciones y supuestos efectuados, las condiciones del modelo físico con el que se realizaron las pruebas, los diseños de los elementos Dozer y Panzer, la instrumentación de laboratorio y sistema de automatización usados y el material granular empleado.

3.2 Consideraciones y Supuestos

En general, el trabajo de investigación cuenta con las siguientes consideraciones y supuestos:

1. Se considera que las pruebas de pilotaje son llevadas a cabo en un estado de régimen del modulo de Minería Continua. Además, se suponen dos turnos de trabajo al día, con seis horas de duración cada uno, detallándose los resultados productivos a esta escala temporal: extracción a corto plazo.
2. Se considera fuera de los alcances de la tesis la representación y estudio del componente Sizer de la Minería Continua.
3. Se considera que la construcción del modelo físico no contempla la similitud en cuanto al coeficiente de fricción de las paredes, es decir, la estructura del modelo físico se mantiene intacta. En relación a la similitud dinámica, ésta queda fuera de los alcances del trabajo debido a la dificultad de su cumplimiento a través de modelos físicos. Lo anterior tiene como consecuencia el descarte del estudio de los fenómenos de frecuencia de colgaduras y fragmentación secundaria.
4. Las variables a estudiar sin y con automatización son:
 - Productividad del Dozer (g/ciclo).
 - Largo de descarga de Dozer (cm).
 - Productividad del sistema (g/min).
 - Utilización del Panzer (%).
5. Los parámetros principales de la etapa de pruebas de pilotaje, tanto para el sistema sin y con automatización son:
 - Velocidad del Panzer (cm/s).
 - Tiempo de ciclo Dozer (s/ciclo).
 - Distancia entre Dozer operativos (cm).
 - Máximo número de Dozer operativos simultáneos.

6. En base a las restricciones operacionales de Dozer activos que impiden operar más de cuatro Dozer simultáneos y tampoco dos Dozer que sean adyacentes en la galería de producción (Barriga, 2012; JRI, 2010), se estudiarán tres configuraciones principales: Tipo I, Tipo II y Tipo III. Cada una de estas configuraciones estará compuesta por dos arreglos de Dozer operativos, lo que se traduce en dos turnos al día: Turno A y Turno B (Figuras 3.1 a 3.3).

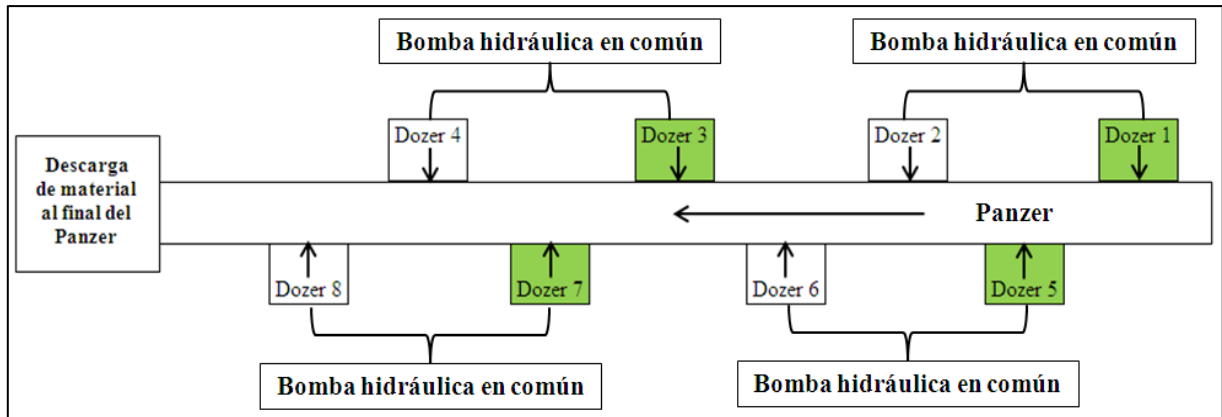


Figura 3.1. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo I: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco)

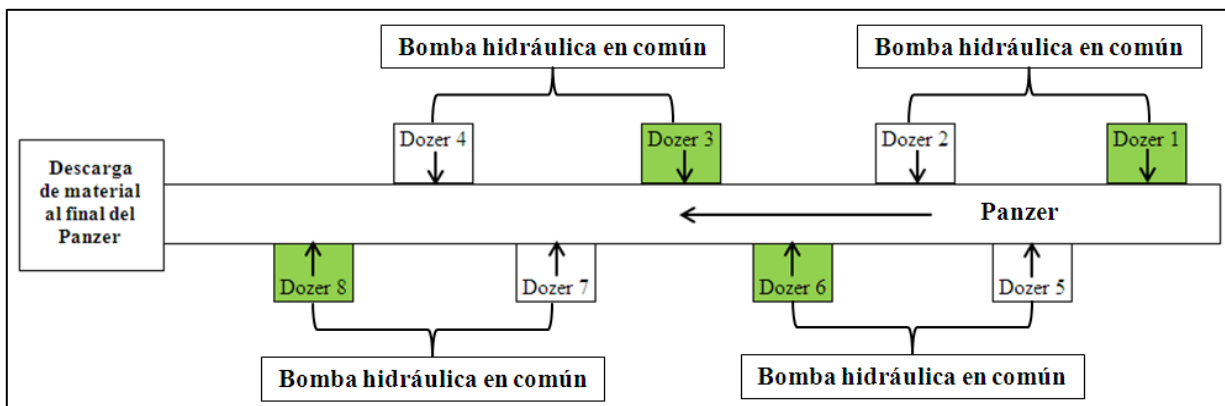


Figura 3.2. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo II: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco)

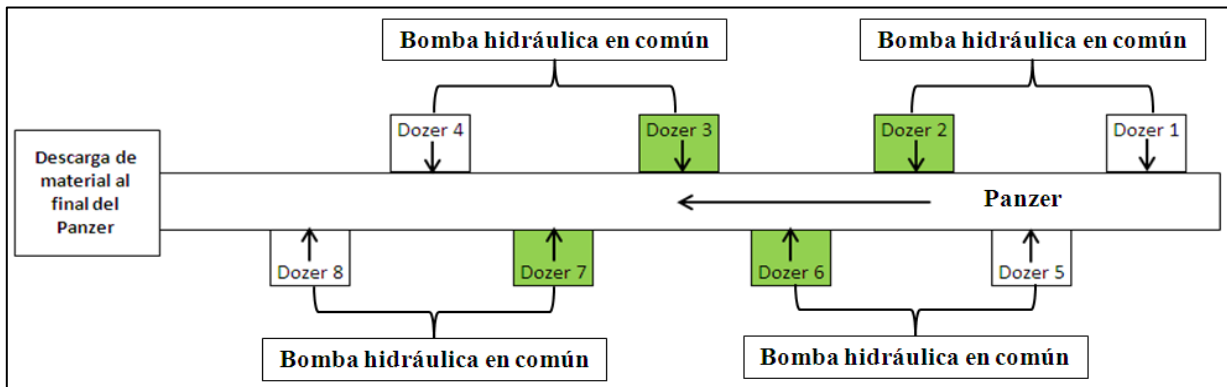


Figura 3.3. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo III: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco)

3.3 Condiciones y Diseño del Modelo Físico

3.3.1 Escala

La selección de la escala del modelo corresponde a 1:50, y está sujeta a las condiciones de las pruebas de laboratorio anteriores, en donde se considera la factibilidad de la construcción del sistema de carguío (Dozer) y su adecuada operación (Alvarez, 2010)², además de ser la misma escala empleada para el estudio de las variables de diseño ejecutado por Orellana (2012). Cabe destacar que el escalamiento se justifica por un análisis de similitud determinado en dichos trabajos precedentes. La Tabla 3.1 resume los parámetros de escalamiento respectivos, donde k_l corresponde al factor de escalamiento geométrico y k_ρ al de densidad.

Tabla 3.1. Factores de escala usados en pruebas de pilotaje

Variable	Escala	Escala ($k_l=1/50$)
Longitud	k_l	0,02
Área	k_l^2	0,0004
Volumen	k_l^3	0,000008
Velocidad	$\sqrt[2]{k_l}$	0,14142
Tiempo	$\sqrt[2]{k_l}$	0,14142
Peso	$k_\rho * k_l^3$	0,000008*k ρ
Presión	$k_\rho * k_l$	0,02*k ρ
Fuerza de presión	$k_\rho * k_l^3$	0,000008*k ρ
Esfuerzo de compresión	k_l	0,02

3.3.2 Diseño y Operación

En cuanto al diseño del modelo físico empleado en el trabajo de tesis, la Tabla 3.2 resume dichos parámetros. El modelo físico consiste en una estructura de paneles de acrílico plexiglass de grosores entre 8 mm (0,3") y 15 mm (0,6"), sustentado en un marco de perfiles cuadrados de hierro de 38,1 mm (1 ½") y 50,8 mm (2") (Figura 3.4). La estructura rectangular contenedora del material granular tiene una altura de 100 cm (39,4").

Tabla 3.2. Dimensiones de modelo físico empleado

Parámetro	Valor escala modelo	Valor escala real
	Físico [cm]	[m]
Altura estructura	100	50
Ancho modelo físico	158	79
Profundidad modelo físico	57	28,5
Número de puntos de extracción	8	8

² Citado por (Orellana, 2012)



Figura 3.4. Modelo físico construido para este trabajo de investigación: (Izquierda) Modelo físico con panel eléctrico y de actuación; (Derecha) Perspectiva del modelo físico cargado con material

La Figura 3.5 muestra diferentes planos con las dimensiones del modelo empleado. La altura de la galería Panzer concretada es de 7,5 cm (3,75 m a escala real), correspondiendo a la altura disponible para que el material sea transportado. Esta altura difiere de la esperada por diseño del módulo de Minería Continua, esto es, 11 cm (5,5 m a escala real), lo que se traduce en una restricción adicional al movimiento de material granular a través del Panzer. Luego, como consecuencia se tendrá la ocurrencia de casos en que la altura del material sobre el Panzer impida el correcto funcionamiento del sistema (mayores detalles en Capítulo 4, Experimento 3).

En la Figura 3.6 se aprecia la geometría de los ápex a nivel de calle de producción y entre bateas.

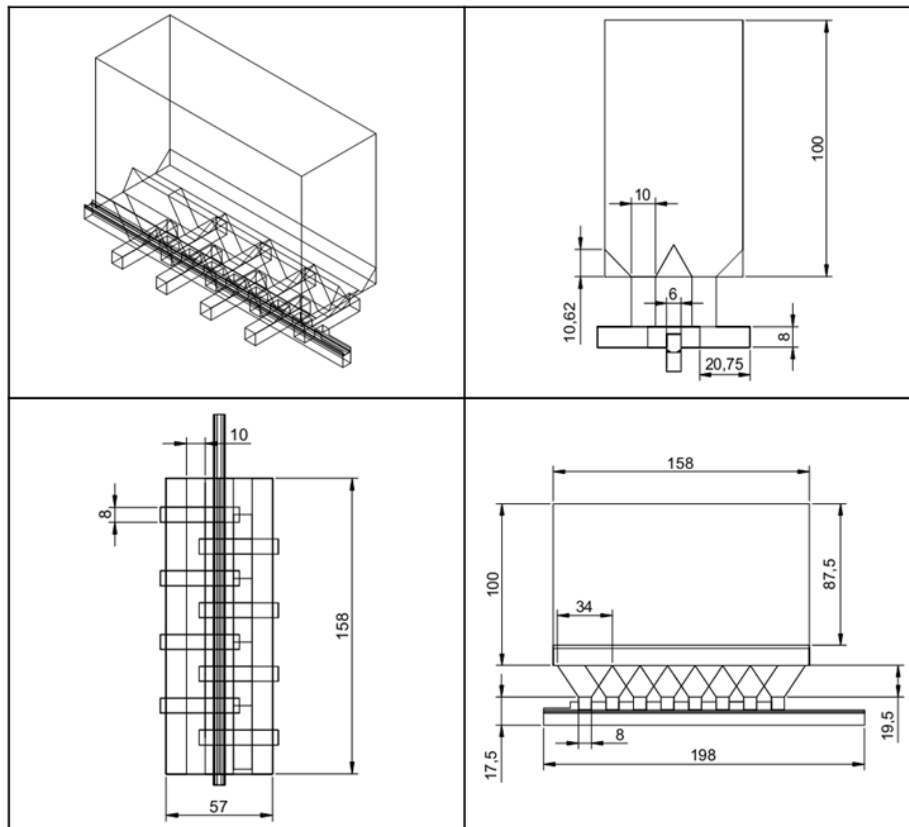


Figura 3.5. Planos del modelo físico empleado: (Arriba-Izquierda) Vista en perspectiva; (Arriba-Derecha) Vista en perfil transversal; (Abajo-Izquierda) Vista en planta; (Abajo-derecha) Vista en sección longitudinal. Unidades en centímetros [cm]

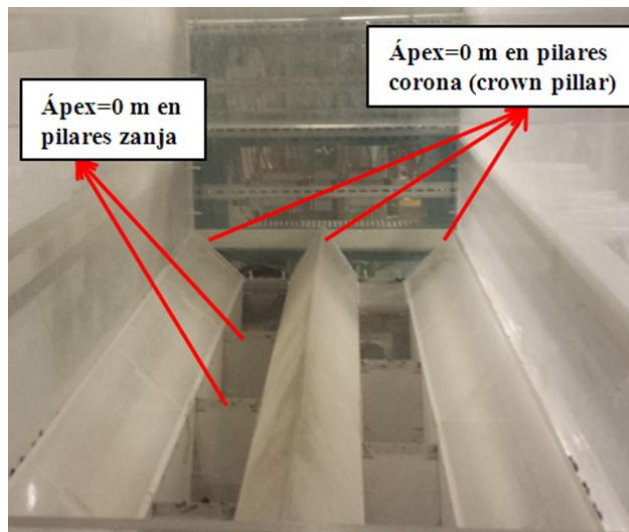


Figura 3.6. Vista en perspectiva de $\text{ápex}=0$ en interior de modelo físico sin material granular

Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran una planta y una sección, ajustada a la escala reducida, de la calle de producción que el modelo físico representa. Se reproduce una malla de 13 m x 17 m (26 cm x 34 cm, a escala del modelo), donde las galerías Dozer tienen dimensiones de 4 m x 4 m (8 cm x 8 cm, a escala del modelo).

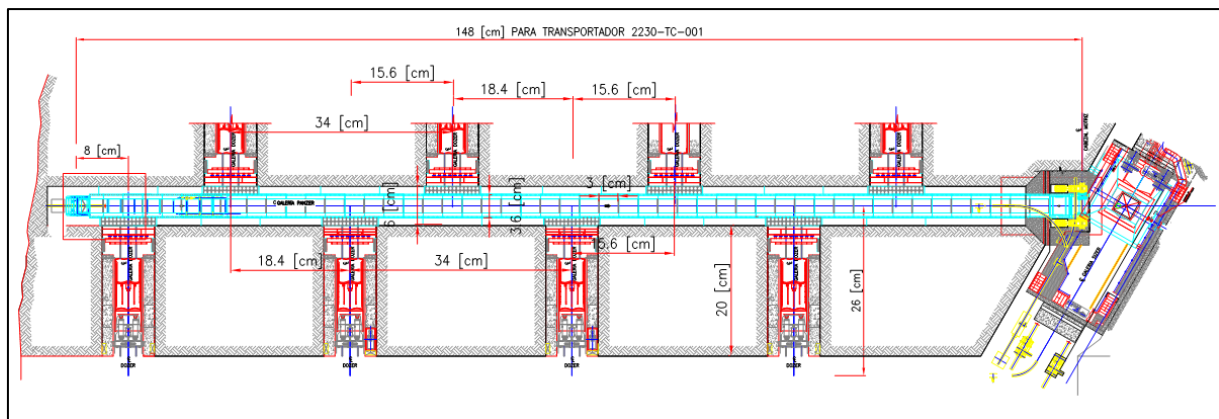


Figura 3.7. Planta de calle de producción de Minería Continua con dimensiones a reproducir en el modelo físico (JRI, 2010)

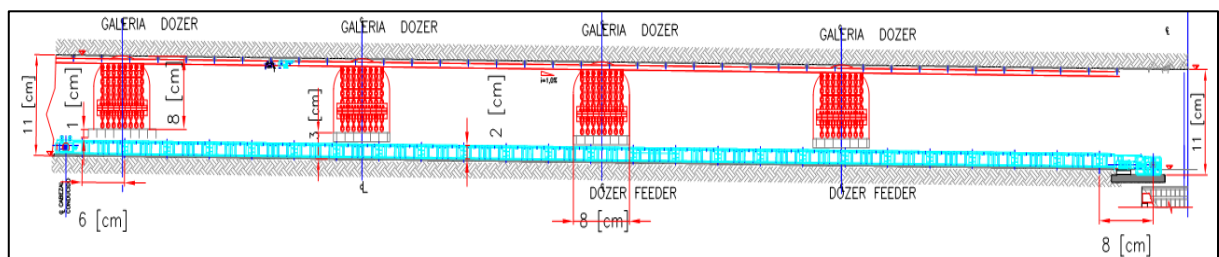


Figura 3.8. Perfil de calle de producción de Minería Continua con dimensiones a reproducir en el modelo físico (JRI, 2010)

3.3.3 Método de Extracción: Equipo Dozer

El equipo Dozer reproducido conserva el diseño original de aquellos usados en los estudios precedentes (Figura 3.9) (Orellana, 2012). El sistema de accionamiento en este caso es neumático y se efectúa mediante electro-válvulas, las cuales emplean aire comprimido y reciben la señal de activación desde un PLC. La Figura 3.10 muestra un Dozer implementado en el modelo físico de este trabajo de investigación.

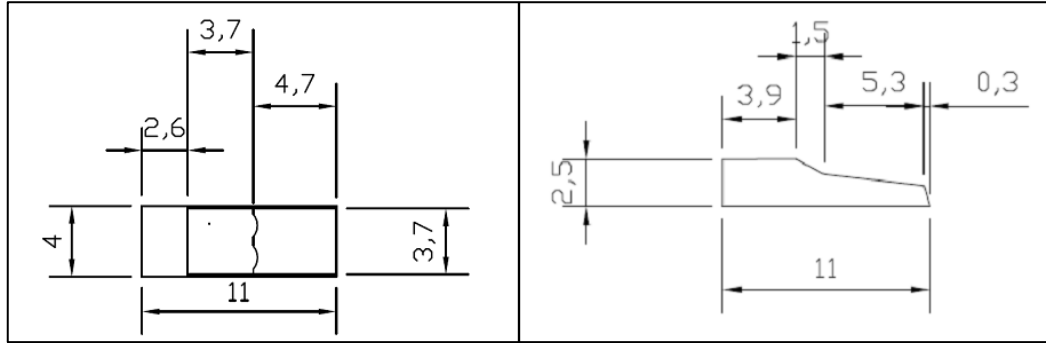


Figura 3.9. Diseño equipo Dozer escalado 1:50: (Izquierda) Vista en planta; (Derecha) Vista en perfil. Unidades en centímetros [cm] (Orellana, 2012)

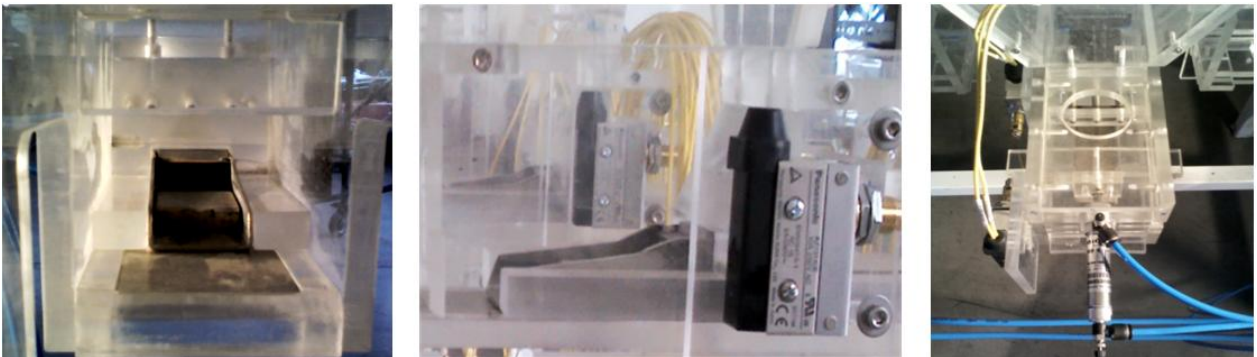


Figura 3.10. Dozer en el modelo a escala: (Izquierda) Vista frontal de Dozer en galería de extracción; (Centro) Vista lateral de Dozer; (Derecha) Vista en planta de galería de extracción Dozer.

3.3.4 Método de Transporte: Equipo Panzer

La construcción del equipo Panzer se restringe a las dimensiones derivadas de los Informes de Ingeniería Básica de JRI (2010). Se genera una galería de producción de 6 cm de ancho (3 m a escala real) en donde el ancho del Panzer es de 3,5 cm (1,75 m a escala real) y su largo es de 198 cm (99 m a escala real). En cuanto al material, este consiste en goma de alta densidad con flexibilidad suficiente para lograr curvarse y ser montada en conjunto a un motor de accionamiento (Figura 3.11). Las barras de arrastre verticales del Panzer, o “eslabones”, tienen un ancho en el modelo de 3 mm (15 cm a escala real). Por otra parte, los espacios entre barras de arrastre son de 2 cm (1 m a escala real).

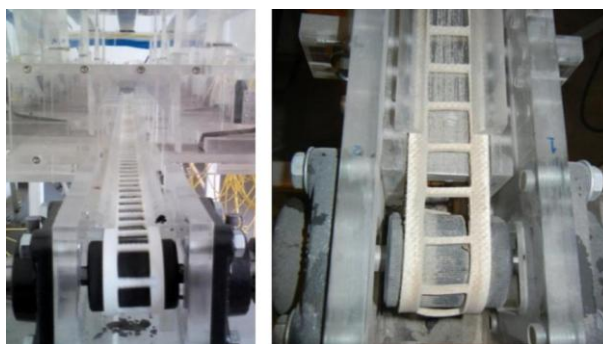


Figura 3.11. Panzer construido para el modelo físico: (Izquierda) Vista en perspectiva de galería de producción con Panzer; (Derecha) Vista en planta de Panzer

Cabe destacar que el Panzer original es construido de material de acero-ferro, al contrario de lo expuesto en esta sección. Dadas las limitantes y complicaciones para lograr concretar la construcción de un Panzer con los mismos materiales que el real, pero a escala reducida, se privilegió la construcción y operación del equipo por sobre la representatividad de sus propiedades físicas. Luego, el Panzer elaborado difiere en su estructura del de escala real, pero cumple a cabalidad las mismas funciones de éste, esto es, transporte del material granular a través del principio de arrastre.

3.4 Instrumentación y Sistema de Automatización

3.4.1 Instrumentación

A lo largo de los experimentos existe un espectro de instrumentos a emplear que varían dependiendo del objetivo de cada una de las experiencias. Este set de elementos principales se detalla en la Tabla 3.3. La Figura 3.12 muestra una vista general de la estructura que contiene el Controlador Lógico Programable (PLC) y los paneles eléctricos de alimentación de energía, así como activación de Panzer. Una vista frontal del PLC usado se aprecia en la Figura 3.13.

Tabla 3.3. Instrumentación a utilizar en experimentos

Instrumentación a emplear	Cantidad
Cilindro neumático para Dozer	8
Electro-válvula para Dozer	8
Sensor de fin de carrera (2 por Dozer)	16
Motor brushless DC para Panzer	1
Caja reductora en motor de Panzer	1
Encoder en Panzer	1
Láser color rojo	4
Cámara de video (webcams)	4
PLC (Controlador Lógico Programable) estándar industrial	1
Computador fijo de escritorio para implementación y manejo de sistema sensorial	1
Computador personal para manejo de sistema de control	1
Balanza digital	1
Compresor de aire	1

Asociado a la instrumentación en el Panzer, el motor brushless DC corresponde a un motor de corriente continua de tres fases que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. El encoder corresponde a un sensor que genera señales digitales en respuesta al movimiento, convirtiendo un movimiento mecánico (posición, ángulo, velocidad o aceleración) en señales eléctricas.



Figura 3.12. Vista general de estructura contenedora de PLC y paneles eléctricos de alimentación de energía, así como activación de Panzer



Figura 3.13. Vista frontal de PLC empleado

3.4.2 Sistema de Automatización

Una de las aplicaciones implementadas en el desarrollo de las pruebas de pilotaje del presente trabajo corresponde al sistema de automatización. Este sistema es el encargado de controlar y supervisar el funcionamiento del sistema de Minería Continua. En particular, las principales funciones que realiza son:

- Obtención de la información requerida para el control de Minería Continua, a partir de los subsistemas.
- Control automático de la producción de Minería Continua en base al requerimiento de planta.

El sistema contempla tres subsistemas: sistema de actuación, sistema de sensado y sistema de control, los cuales trabajan de manera independiente, pero comunicados con el sistema de automatización de Minería Continua. La Figura 3.14 muestra un esquema del sistema a nivel de bloques.

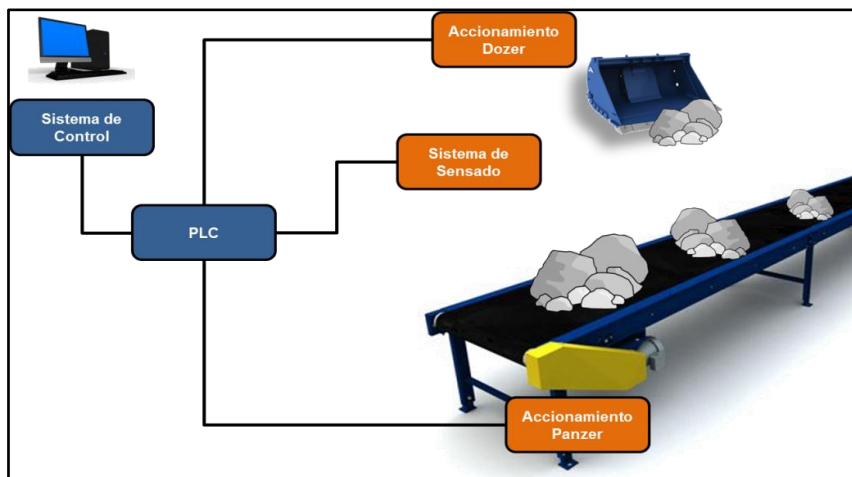


Figura 3.14. Esquema de Sistema de automatización de Minería Continua

3.4.2.1 Sistema de Actuación

El sistema de actuación de los componentes del modelo físico se divide en dos:

- Actuación de Dozer: sistema neumático, el cual a través de un compresor de aire, electroválvulas y cilindros neumáticos de hasta 10 bar de presión (fueron empleados 8 bar operativos), permiten el movimiento lineal de cada Dozer (Figuras 3.15 y 3.16). Las electroválvulas, o válvulas eléctricas, son controladas mediante las salidas digitales (on/off) de un PLC. Adicionalmente, cada Dozer posee dos fines de carrera (Figura 3.17) para detectar los límites de su movimiento lineal tanto para el empuje como el retroceso del equipo. Cada uno de estos sensores está conectado a una entrada digital del PLC.

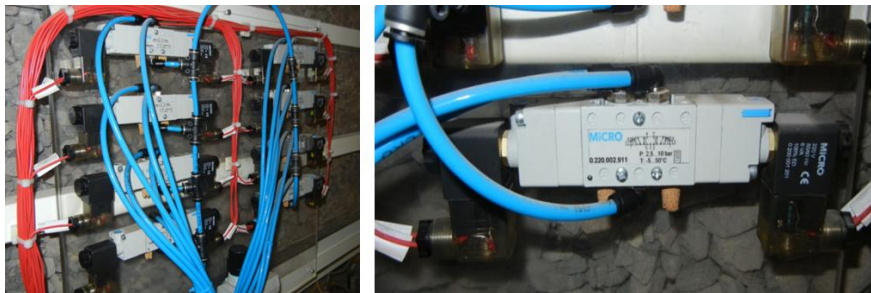


Figura 3.15. (Izquierda) Vista posterior de modelo físico con panel de electroválvulas de activación neumática de Dozer. (Derecha) Detalle de electroválvula de activación de Dozer



Figura 3.16. Accionamiento neumático Dozer

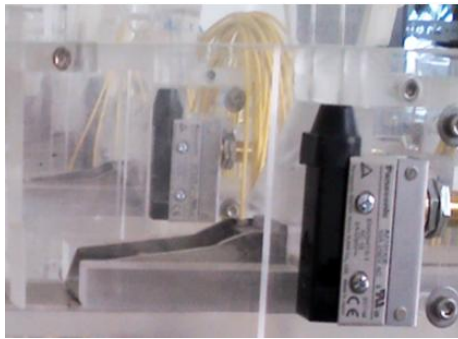


Figura 3.17. Perfil de Dozer con fin de carrera de retroceso (dispositivo a la derecha) instalado en modelo físico

- Actuación de Panzer: sistema de tracción, el cual mediante un motor eléctrico trifásico y una caja reductora, permiten el movimiento lineal de la correa del transportador Panzer. El motor eléctrico se encuentra en la cabeza del transportador (Figura 3.18) y es controlado a través de un variador de frecuencia, el cual permite ajustar la velocidad requerida del Panzer. Adicionalmente, en la cola del transportador Panzer se encuentra instalado un Encoder, el cual permite medir la velocidad angular real del eje giratorio de la cola. Este sensor se encuentra conectado al variador de frecuencia para el control efectivo de la velocidad.

Por otro lado, el variador de frecuencia posee comunicación Ethernet y mediante el protocolo ModBus³ es posible comunicarlo con el PLC. Con esto, el PLC puede controlar la velocidad del variador de frecuencia y, por consiguiente, la velocidad del motor.

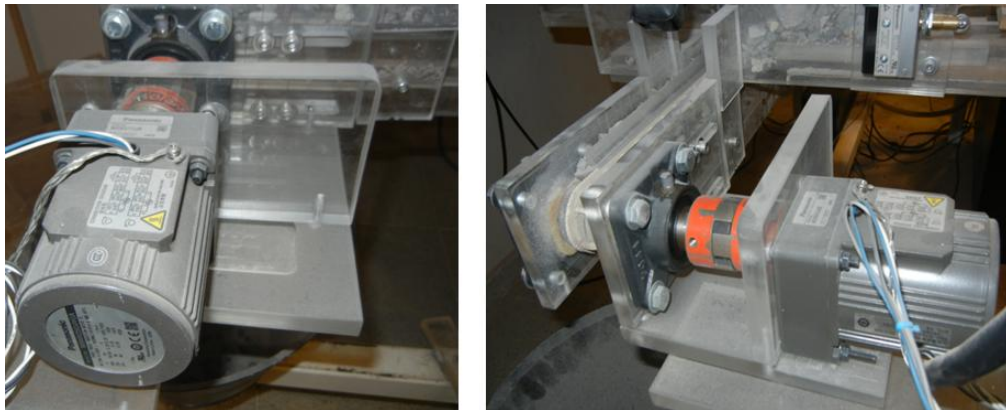


Figura 3.18. (Izquierda) Vista lateral de motor de activación de transportador Panzer. (Derecha) Vista general de motor de activación de transportador Panzer

3.4.2.2 Sistema de Sensado

El sistema de sensado consiste de cuatro prototipos de sensores de volumen diseñados e implementados para el modelo físico en estudio. En cuanto a su diseño, el sistema se basa en el principio de fotogrametría de luz estructurada, que es una combinación de procesamiento de imágenes y luz estructurada.

³ Protocolo de comunicaciones estándar basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor

Con respecto al concepto de luz estructurada, en el área de visión computacional es definida como la luz con cierta característica. Este tipo de sistemas es comúnmente integrado por tres componentes: fuente de luz, dispositivo de captura de imagen y algoritmo de procesamiento.

El sistema de sensado detecta el borde o contorno del material transportado por el Panzer desde una imagen estática, obtenida por una cámara de video instalada en el techo de la galería Panzer y orientada con determinado ángulo de inclinación (α) sobre el eje horizontal de la galería (Figura 3.19). Mayores detalles en cuanto a la conversión (desde píxeles a milímetros), calibración y pruebas de precisión y reconstrucción del sistema de sensado pueden ser apreciados en el Anexo D.

Dadas las condiciones de alta concentración de polvo en la galería Panzer, el contorno a detectar es resaltado mediante una línea láser, proveniente de un emisor láser dispuesto ortogonalmente al plano del Panzer. Con esto, aun cuando exista polvo en suspensión, la mayor reflexión del láser se obtendrá en la superficie del material.

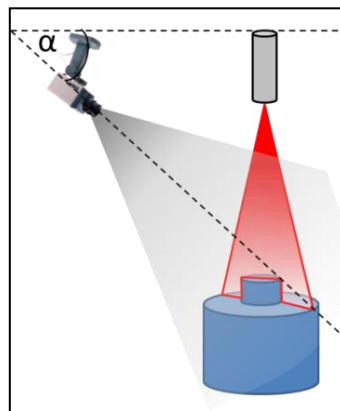


Figura 3.19. Esquema de la disposición de los componentes del sistema de sensado

En lo concerniente a los puntos de medición del sistema de sensado, un esquema de una vista en planta de la calle de producción de Minería Continua es presentado en la Figura 3.20. En dicha figura, las flechas indican el sentido de movimiento de material granular. La Tabla 3.4 precisa la posición en la que se encuentran los puntos de medición.

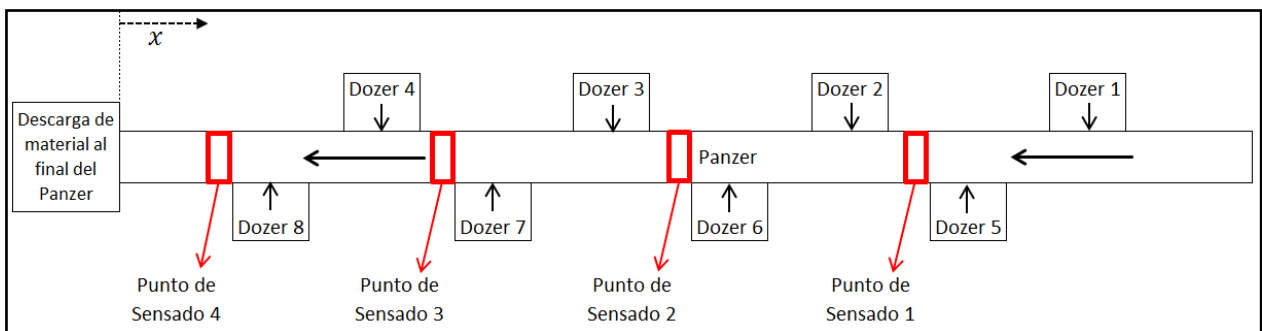


Figura 3.20. Esquema de posición de puntos de sensado de sistema sensorial en calle de producción. Variable x corresponde a la distancia desde la salida del material del sistema (descarga al final del Panzer o descarga en Sizer)

Tabla 3.4. Ubicación de puntos de medición del sistema de sensado

Punto de sensado	x (distancia acumulada desde descarga de material al final del Panzer) [cm]
1	122,0
2	88,8
3	54,5
4	19,5

Asociado a la implementación del sistema, se tiene que son usadas webcam Microsoft LifeCam HD-5000, las cuales poseen una resolución máxima para video de 1280 x 720 píxeles a una tasa de 30 cuadros por segundo. El emisor de luz consiste en un módulo láser de línea roja de bajo costo, de 5 mW de potencia. La Figura 3.21 muestra esta implementación en el modelo.

El sistema de adquisición y procesamiento de imagen está implementado en lenguaje C++ utilizando la plataforma OpenCV (Open Source Computer Vision). En la interfaz gráfica de usuario (GUI), es posible ajustar los parámetros de referencia y otros parámetros utilizados para ajustar otras características como brillo de la imagen y los límites horizontales de captura de imagen.

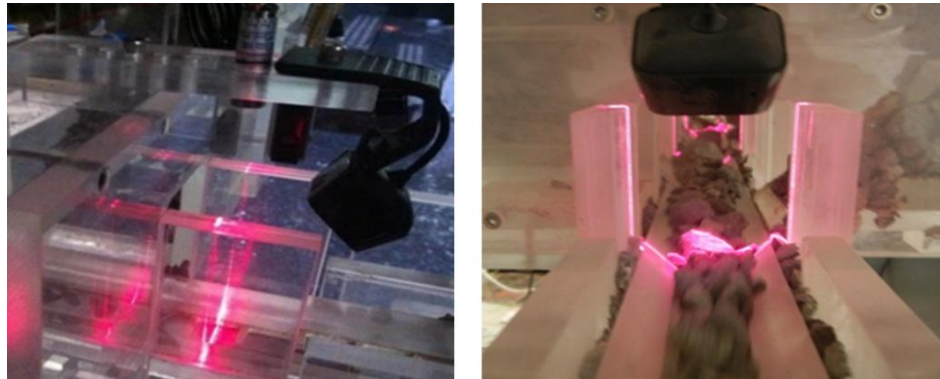


Figura 3.21. Sistema de sensado implementado en el modelo físico: (Izquierda) Vista lateral del sistema de sensado; (Derecha) Vista en perspectiva de la galería de producción con el sistema de sensado

3.4.2.3 Sistema de Control

El último elemento del sistema de automatización empleado corresponde al sistema de control. El objetivo de este sistema es maximizar la cantidad de material así como también la uniformidad de la carga en el Panzer. Esto último puede ser interpretado como un proceso de minimización de la variación de altura de la carga del Panzer.

De manera simplificada, para lograr su objetivo, el sistema de control comienza con una suposición de la cantidad de material a extraer por cada Dozer, la cual es comparada con las mediciones del sistema de sensado a lo largo del Panzer. Luego, el sistema corrige la cantidad de material en el Panzer y activa, de ser necesario, otros Dozer en el Panzer.

La implementación del sistema de control ha sido probada en los sistemas Windows, Linux y OS-X. Se comunica con el PLC de control del sistema de Minería Continua a través de una

conexión Modbus sobre Ethernet. El sistema dispone de una interfaz donde es posible asignar las tasas de extracción de los Dozer, habilitar o deshabilitar Dozer (operativos o no-operativos), establecer la velocidad del Panzer y de los tiempos de ciclo de los Dozer (Figura 3.22). Dicha interfaz incorpora una representación del modelo de distribución de carga en el Panzer (Figura 3.23). Para mayores detalles del funcionamiento del sistema de control revisar Anexo E.



Figura 3.22. Interfaz de Usuario de Configuración y Control

En la Figura 3.22 se muestran los controles de tasas de extracción de cada punto, las casillas de habilitación de cada Dozer, la velocidad del Panzer, así como una sugerencia de velocidad estimada en base a las tasas de extracción deseadas. La casilla “auto” establece la velocidad del Panzer en la velocidad sugerida por el sistema automático. Cabe destacar que en relación a esto último, para efectos de las pruebas de pilotaje realizadas, no se empleó la velocidad del Panzer sugerida por el sistema, sino que se fijó en 2,12 cm/s (9 m/min a escala real). Finalmente, en la interfaz están los controles de los tiempos de ciclo del Dozer (descarga y retorno). Estos últimos tiempos son ajustados de tal manera que cumplan con los 16 s/ciclo (2 min/ciclo a escala real) correspondientes al tiempo total de ciclo Dozer. La asignación representada en la figura hace alusión a que la descarga del Dozer suele ser abrupta, ocupando una baja porción del tiempo de ciclo (asociado al sistema neumático de activación y sus limitantes). Luego, se designa que la mayor parte del tiempo el Dozer esté en etapa de retroceso, la cual involucrará el tiempo que el Dozer se encuentra detenido al final de la carrera y el tiempo de movimiento de retroceso propiamente tal.

La Figura 3.23 muestra la curva de distribución de carga en el Panzer en color gris sólido y la capacidad de carga reservada en blanco sin relleno. Los Dozer activos se muestran en color verde, los Dozer deshabilitados se muestran como cajas negras sin relleno. La posición de cada Dozer está marcada con una línea vertical amarilla. Las mediciones del sistema de sensado de medición de carga puntual están graficadas como una barra azul para cada sensor.

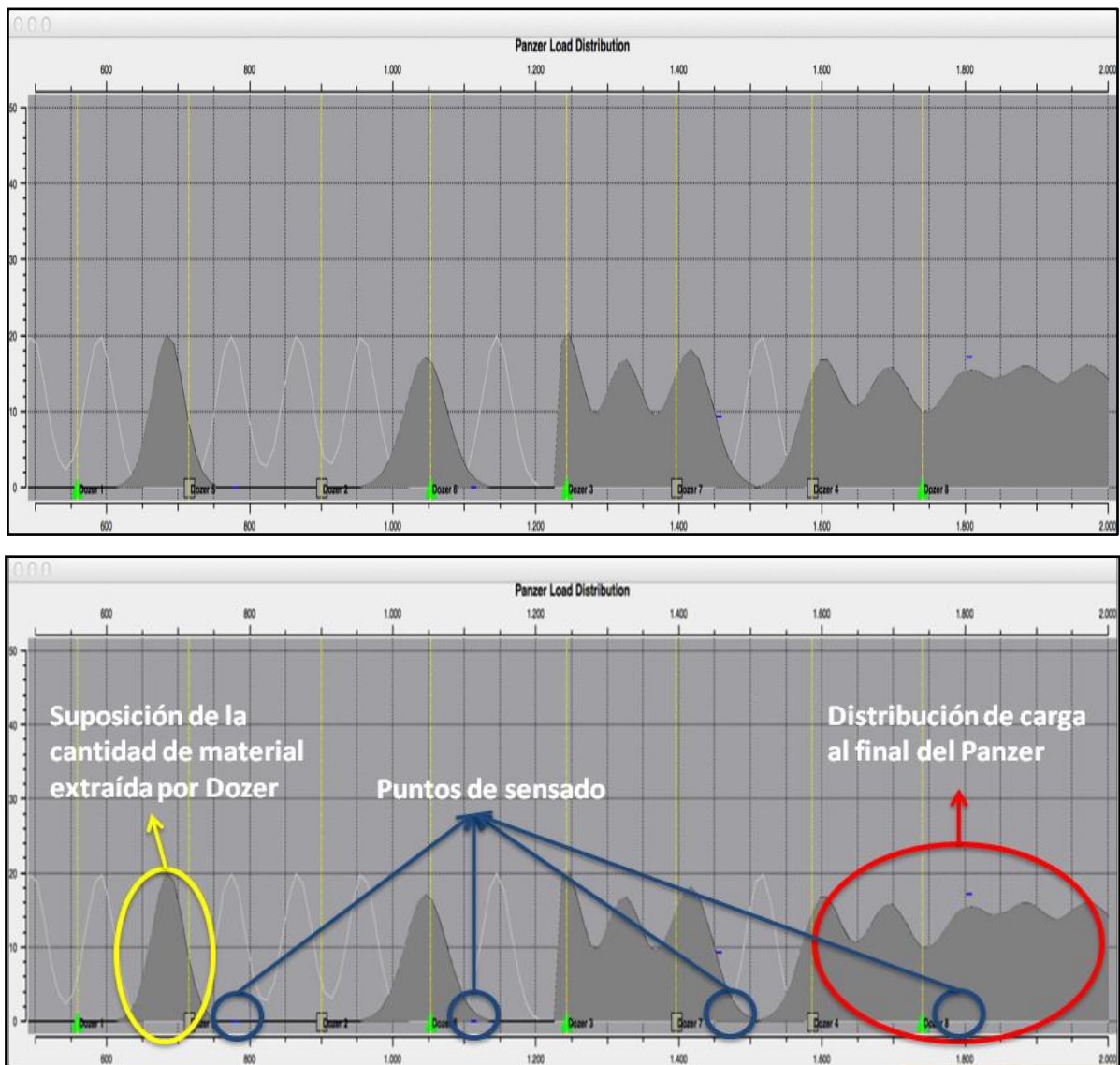


Figura 3.23. (Arriba) Interfaz de usuario modelo de carga; (Abajo) Interfaz de usuario de modelo de carga con detalle de componentes

3.5 Caracterización del Material

El material granular utilizado en las pruebas de pilotaje corresponde a grava de río chancada con una densidad de $2,69 \text{ t/m}^3$, la cual es separada a través de harneros para generar las distribuciones de tamaño de partículas requeridas. En las pruebas se utilizan dos distribuciones diferentes, caracterizadas por su tamaño medio (d_{50}) y su coeficiente de uniformidad (C_u). Los parámetros característicos anteriores, además del coeficiente de curvatura (C_z) y la resistencia a la carga puntual, se explicitan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros característicos de distribuciones de tamaño de partículas empleadas

Parámetro	Granulometría G1 (Andina)		Granulometría G2 (Chuquicamata)	
	Escala real	Escala 1:50	Escala real	Escala 1:50
Tamaño medio d_{50} [cm]	80	1,59	97	1,94
Coficiente de Uniformidad, C_u	2,6	2,6	2,2	2,2
Coficiente de Curvatura, C_z	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistencia a la Carga Puntual [MPa]	6,2 ($\pm 1,6$)			

Se busca replicar la granulometría esperada en faena, tanto para División Andina con su sistema de Minería Continua (caso de Granulometría G1) como para un caso de fragmentación más gruesa correspondiente a un macrobloque específico del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) (Granulometría G2). Para la aplicación a escala de laboratorio se usa el factor de escalamiento $\lambda = 1/50$, con el propósito que el material utilizado sea representativo en el modelo.

Con respecto a la Granulometría G1, se cuenta con 1.200 kg de material, los cuales llenan 82 cm de la altura del modelo físico (equivalentes a 41 m de columna de material a escala real). Dicha granulometría busca replicar la distribución de tamaño de partículas esperada posterior a la aplicación del pre-acondicionamiento en el módulo de Minería Continua en División Andina (Figura 3.24). La transformación de los tamaños de dicha distribución a los escalados y empleados en las pruebas experimentales se aprecia en la Tabla 3.6. Notar que se ha escalado la curva correspondiente al caso de “gruesos” de la Figura 3.24.

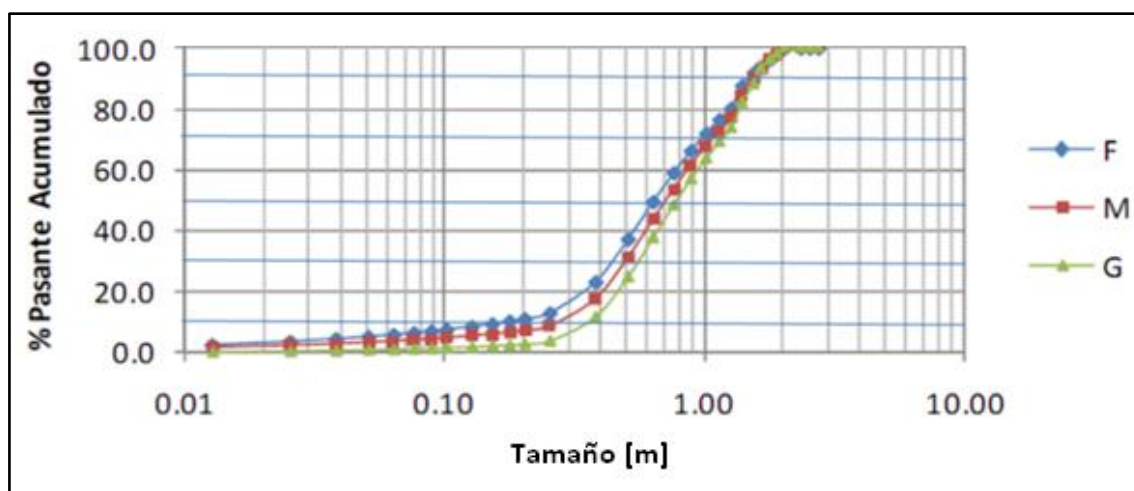


Figura 3.24. Distribución granulométrica que considera el pre-acondicionamiento, alimentación a chancador Sizer (JRI, 2010). Notación de tamaños: F: Finos, M: Medianos; G: Gruesos

Tabla 3.6. Distribución granulométrica G1 con valores a escala real y escalados

Escala real	Escala 1:50	
Tamaño [m]	Tamaño [mm]	Fu [%]
1,9	38,1	100
1,3	25,4	75
1,1	22,2	69
0,8	16,0	50
0,6	12,7	38
0,5	9,5	25
0,3	6,4	0

La Granulometría G2 es usada con el objetivo de estudiar el efecto de una granulometría más gruesa en la productividad del sistema. En efecto, la modificación anterior implica un aumento en un 22% del tamaño de partícula d_{50} ($d_{50}=15,9$ mm para G1 y $d_{50}=19,4$ mm para G2). En este caso se emplean 700 kg de material granular, lo cual permite una altura de llenado de 50 cm del modelo físico (equivalentes a 25 m en escala real). Esta distribución se basa en la fragmentación esperada para el sector Americana Sur del Nivel 1 del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) proveniente de un estudio realizado por SRK Consulting Inc. como soporte para la etapa de factibilidad del proyecto. En la Figura 3.25, la curva verde desplazada más a la derecha (#5, más gruesa) ha sido la escalada (mayores detalles en Anexo C).

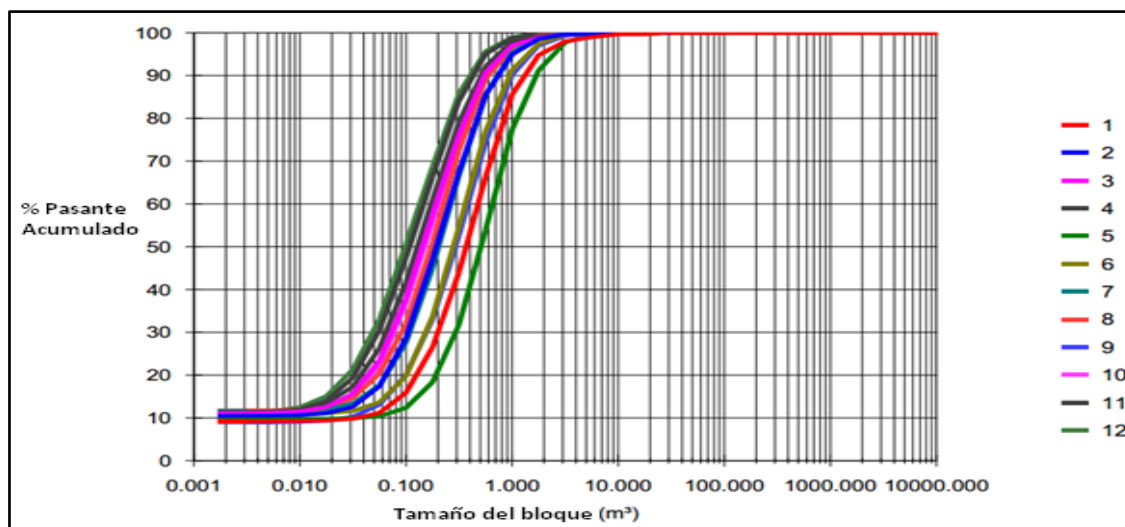


Figura 3.25. Sector Americana Sur PMCHS: Nivel 1 (cota 1841 msnm)-Rangos de fragmentación secundaria Pórfido Este Potásico (PEK)

La Figura 3.26 ilustra una muestra de cada tipo de granulometría, G1 y G2. En la Figura 3.27 se aprecian las distribuciones usadas y los ajustes de Rosin – Rammler llevados a cabo. La Tabla 3.7 explicita las distribuciones con las masas correspondientes a cada intervalo.



Figura 3.26. Muestras de las granulometrías utilizadas: (Izquierda) Granulometría G1, $d_{50}=15,9$ mm; (Derecha) Granulometría G2, $d_{50}=19,4$ mm

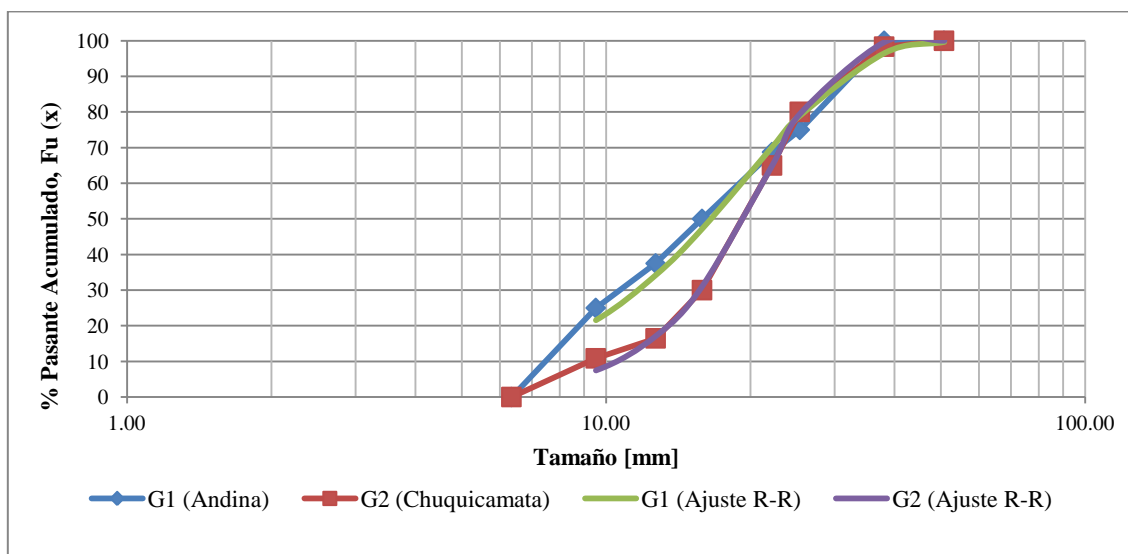


Figura 3.27. Granulometrías implementadas en pruebas experimentales y ajustes de Rosin – Rammler modelados

Tabla 3.7. Distribuciones de tamaño de partícula empleadas en plan experimental

Malla	Tamaño [mm]	Granulometría G1 (Andina) $d_{50}=15,9$ mm		Granulometría G2 (Chuquicamata) $d_{50}=19,4$ mm	
		Masa [kg]	Fu [%]	Masa [kg]	Fu [%]
		- 2" + 1 ½"	50,8	0	100
- 1 ½" + 1"	38,1	300	100	128	98
- 1" + 7/8"	25,4	75	75	105	80
- 7/8" + 5/8"	22,2	225	69	245	65
- 5/8" + 1/2"	16,0	150	50	95	30
- 1/2" + 3/8"	12,7	150	38	39	16
- 3/8" + 1/4"	9,5	300	25	76	11
- 1/4"	6,4	0	0	0	0
Total		1.200		700	

3.6 Metodología

A continuación se esbozan los pasos de la metodología experimental (Figura 3.28):

1. Escalamiento. Se construye un modelo físico basado en los factores de escala emanados tras los estudios previos asociados a la Minería Continua, que simula ocho (8) equipos Dozer y un (1) equipo Panzer de la ingeniería desarrollada para el proyecto de Minería Continua.
2. Etapa de puesta en marcha y modificaciones. Se detectan las limitaciones de operación del sistema y qué aspectos de diseño deben cambiarse. Posteriormente se llevan a cabo las modificaciones pertinentes con el objetivo de resolver los problemas identificados y optimizar el funcionamiento del sistema.
3. Etapa de experimentación sin automatización: Sistema de Minería Continua (SMC). Se llevan a cabo pruebas que buscan caracterizar las descargas de los equipos Dozer, así como identificar configuraciones principales de operación y productividades asociadas.
4. Etapa de experimentación con automatización: Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA). Se desarrollan pruebas implementando un sistema de sensado en conjunto con un sistema de control. Se busca determinar el impacto de la automatización en la productividad del sistema de Minería Continua.
5. Etapa de conciliación de datos y análisis de resultados experimentales. Se contrastan los resultados obtenidos tras la realización de los experimentos. Se genera un análisis y propuesta de soluciones a los problemas que podría enfrentar el sistema en estudio, además de conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

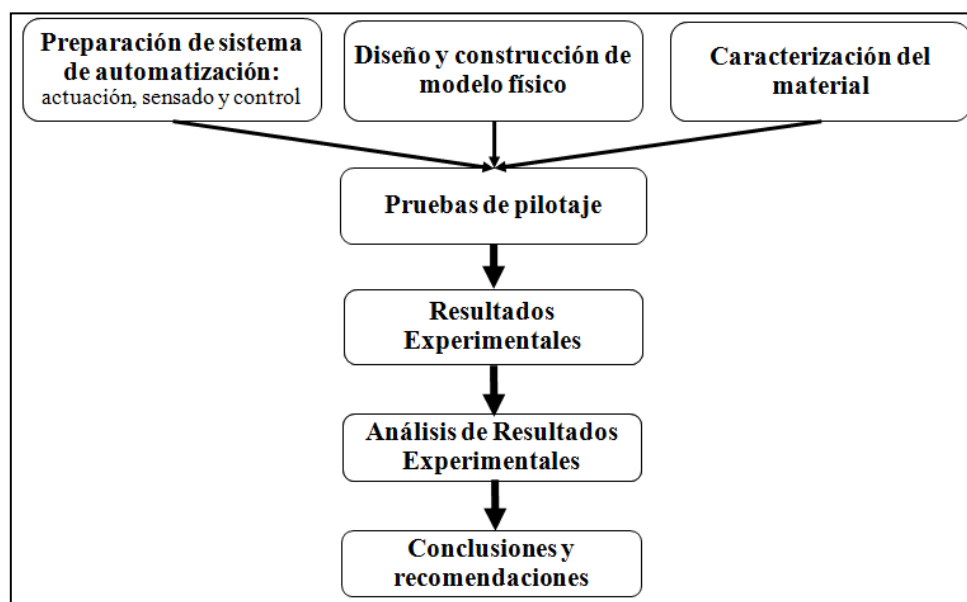


Figura 3.28. Diagrama de flujo de metodología experimental

3.7 Procedimiento de Trabajo General en Pruebas de Pilotaje

El procedimiento de trabajo general llevado a cabo en las pruebas de pilotaje de Minería Continua y Minería Continua Autónoma es el siguiente:

1. **Preparación del Material.** En esta primera etapa se generan las granulometrías a utilizar a través del chancado, tamizado y homogeneización.
2. **Llenado.** Material es ingresado al modelo físico, llenándolo de la manera más homogénea posible.
3. **Preparación de Instrumentación.** Preparación de los instrumentos asociados a cada experimento. El caso sin automatización no requiere más que el sistema de actuación y el secuenciador de Dozer fijo. Por otro lado, el caso con automatización necesita el sistema de actuación, el sistema de sensado (láser y cámaras) e implementación del sistema de control.
4. **Extracción.** Material es extraído por los Dozer seleccionados, pesando la masa extraída por el sistema cada cierto intervalo de tiempo. En esta etapa, se emplean dos baldes receptores de plástico y una balanza digital.
5. **Rellenado.** Finalizada una prueba, el material extraído es vertido nuevamente en el modelo para la generación de otra experiencia, con el propósito de que la presión lito-estática de cada experimento sea la misma.

3.8 Conclusiones

Las principales conclusiones generadas a partir de la elaboración de la metodología son:

1. La escala elegida para el modelo es de 1:50, considerando la factibilidad de la construcción del sistema de carguío (Dozer) y de transporte (Panzer), así como su adecuada operación. En cuanto al primer sistema, ya se ha probado su funcionamiento en estudios anteriores, quedando comprobar el correcto desempeño del Panzer. Conjuntamente, las pruebas experimentales no consideran confinamiento, quedando fuera del alcance de este trabajo el estudio de la frecuencia de colgaduras. De esta manera, únicamente los resultados cualitativos de comportamiento e interacción de componentes de extracción Dozer – Panzer, así como los resultados cuantitativos asociados a productividad del sistema de Minería Continua podrían ser llevados a aplicaciones industriales.
2. Se prevé que el funcionamiento del Panzer construido permitirá replicar el principio de arrastre gobernante en el equipo a escala real.

CAPÍTULO 4: PRUEBAS DE PILOTAJE DE LA MINERÍA CONTINUA

4.1 Introducción

El presente trabajo de investigación involucra la utilización de un modelo físico a escala representativo de una calle de producción del módulo de Minería Continua que se encuentra bajo construcción en División Andina de CODELCO. Esta herramienta es empleada para la generación de pruebas de pilotaje, las cuales otorgan resultados que contribuyen al mejor entendimiento de esta tecnología.

En este Capítulo se explicita el plan experimental llevado a cabo en cuanto a la operación del Sistema de Minería Continua sin automatización, detallando cada una de las pruebas y sus resultados primordiales. Finalmente, se entregan las conclusiones pertinentes derivadas de la ejecución de las experiencias.

4.2 Plan Experimental

El plan experimental de este Capítulo está sometido a las variables y parámetros esbozados en la sección de consideraciones y supuestos del Capítulo 3, detallándose en la Tabla 4.1. Dicho plan del trabajo de tesis se detalla en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Variables y parámetros de plan experimental para pruebas de pilotaje de Minería Continua

Variables	Parámetros
Productividad del Dozer [g/ciclo]	Velocidad del Panzer: 2,12 [cm/s]
Largo de descarga de Dozer [cm]	Tiempo de ciclo Dozer: 16 [s]
Productividad del sistema [g/min]	Distancia entre Dozer operativos [cm]
Utilización del Panzer [%]	Máximo número de Dozer operativos simultáneos
	Desfase temporal de Dozer

Para la experimentación sin automatización, el desfase temporal de Dozer será un parámetro fijo basado en los largos de descarga de los Dozer que sean seleccionados como activos durante la operación.

La velocidad del Panzer y el tiempo de ciclo Dozer expuestos en la Tabla 4.1 corresponden a los valores escalados desde sus respectivos valores a escala mina: 9 m/min y 2 min, respectivamente. El máximo número de Dozer operativos simultáneos hace referencia a las restricciones mencionadas en el Capítulo 2, donde dos Dozer adyacentes compartirían una unidad de activación, por lo que no pueden estar operativos al mismo tiempo.

Tabla 4.2. Plan Experimental detallado de trabajo de investigación desarrollado para pruebas de pilotaje de Minería Continua

N° Exp.	Objetivos y procedimiento
1	a. Experimento de Puesta en Marcha. Estudio del sistema completo, verificando el funcionamiento del mismo e identificando errores para su corrección.
2.1	a. Caracterización del sistema de extracción Dozer – Panzer usando Granulometría G1. b. Se pretende estudiar y entender evolución de distribución de material en Panzer tras descarga de Dozer. Se busca comprender cómo se va redistribuyendo el material a lo largo del transportador Panzer a medida que éste se mueve. c. Se caracterizan las descargas de los Dozer: medición de largos y productividades de descargas.
2.2	a. Caracterización del sistema de extracción Dozer – Panzer usando Granulometría G2. b. Ídem puntos b y c de Experimento 2.1.
3	a. Caracterización de interacciones e interrupciones operacionales de sistema de extracción Dozer - Panzer usando Granulometría G1. b. Se realizan descargas de material desde los Dozer sobre material inicial ya disponible en el Panzer. c. Se evalúa la interacción de dichas descargas y si es que es posible descargar sobre el Panzer en tramos que ya contienen material.
4	a. Experimento de Sistema de Minería Continua (SMC) sin descuelgue de zanjas . Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro (4) Dozer operativos simultáneos. b. Se identifican y testean tres (3) configuraciones de operación principales. c. Se generan secuenciamientos de Dozer en base a datos de Exp. 2.1. Desfases son de carácter fijo. d. Se estudian parámetros de productividad y utilización del Panzer. e. Medición de producción del sistema al final del Panzer cada 5 min.
5	a. Experimento de Sistema de Minería Continua (SMC) con descuelgue de zanjas . Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro (4) Dozer operativos simultáneos. b. Ídem puntos c, d y e de Experimento 4. Se incorpora el descuelgue inmediato de zanjas que presenten estado de colgadura durante la operación.
6	a. Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. No se efectúa descuelgue de zanjas durante operación del sistema. b. Se utilizan como máximo 5, 6, 7 y 8 Dozer operativos simultáneamente. c. Se escogen Dozer operativos a partir de la configuración más productiva de Experimento 4. d. Ídem puntos c, d y e de Experimento 4.
7	a. Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. Se efectúa descuelgue inmediato de zanjas que presenten estado de colgadura durante operación del sistema. b. Ídem puntos b, c y d de Experimento 6.

4.3 Resultados Experimentales

4.3.1 Experimento 1

Este experimento de puesta en marcha tiene como objetivo primordial comprobar el correcto funcionamiento de los componentes del modelo físico para la identificación de problemas operacionales. Posteriormente, en base a las dificultades reconocidas se llevan a cabo modificaciones con tal de favorecer el desarrollo de las demás experiencias. Durante la prueba se emplea material de la Granulometría G1.

De los inconvenientes reconocidos, se tiene que el material fino genera problemas de desplazamiento del Dozer, además de atascamientos y detenciones de la correa de goma del Panzer. Lo anterior se debe a material fino que se ubica entre la correa de goma y la placa de acero de la base, el cual genera un mayor roce y fricción que finalmente termina por detener el movimiento del componente.

La Tabla 4.3 resume los principales problemas surgidos como consecuencia de la realización de la puesta en marcha, así como las soluciones planteadas y los resultados emanados de su aplicación. Se concluye que los cambios efectuados en esta etapa permiten un correcto desempeño del sistema para las pruebas posteriores.

Tabla 4.3. Inconvenientes y soluciones asociadas al Experimento de Puesta en Marcha

Equipo	Problema	Solución propuesta	Resultado
Dozer	▪ Desplazamiento reducido	▪ Supresión de material granular fino bajo 6,4 mm (1/4")	▪ Desplazamiento mejorado
	▪ Levantamiento de placas de acero ubicadas en partes móviles	▪ Soldar placas que se levantan	▪ Desplazamiento mejorado y carencia del levantamiento de las placas de acero de Dozer
Panzer	▪ Deposición de material bajo el Panzer, al final por donde se genera la descarga	▪ Adición de un recipiente de acrílico al final del Panzer	▪ Material cae sin mayores problemas en recipiente, disminuyendo la deposición observada
	▪ Detención del Panzer por ubicación de material bajo el mismo	▪ Supresión de material granular fino y ajuste de placas triangulares de acrílico	▪ Inhibición de las detenciones por acumulación bajo el Panzer o entre el Panzer y las placas triangulares de acrílico

4.3.2 Experimento 2.1

Tras la realización el Experimento de Puesta en Marcha, se procede a efectuar el Experimento 2.1, consistente en la ejecución de descargas individuales de los ocho (8) equipos Dozer disponibles en el modelo físico.

El principal objetivo de este experimento es caracterizar el sistema de extracción Dozer – Panzer para la Granulometría G1. Para ello se estudia, de manera cualitativa y cuantitativa, la evolución de la distribución del material descargado por los Dozer en el Panzer.

Se realizan mediciones de dos variables: largo de descarga y productividad de descarga, siendo esta última otorgada por la masa descargada en cada ciclo Dozer. Con lo anterior se obtiene una aproximación de la distribución de productividades de los Dozer, así como del espacio a ocupar por ellos en el Panzer (largos de descarga).

4.3.2.1 Procedimiento

1. Activación de Panzer a velocidad de 2,12 cm/s (9 m/min a escala real).
2. Descarga individual de Dozer seleccionado con su tiempo de ciclo fijo en 16 s (2 min a escala real).
3. Observación y registro visual de evolución del material a lo largo del Panzer.
4. Medición del largo de la descarga realizada una vez alcanzado un estado estacionario en el Panzer (al final del mismo).
5. Medición de la masa de la descarga efectuada: productividad de Dozer.

El proceso anterior se lleva a cabo 50 veces por cada uno de los ocho Dozer, lo que resulta en un total de 400 datos disponibles.

4.3.2.2 Resultados

a) **Cualitativos:** Se registran observaciones y eventos tales como:

1. Colgaduras a nivel del punto de extracción (Figuras 4.1 y 4.2).
2. Rocas que quedan estables sobre las cuñas inclinadas del equipo Panzer y que no son transportadas por la correa de arrastre (Figura 4.3). También existen rocas de gran tamaño (colpas o sobre-tamaños) en los puntos de extracción (Figura 4.4).
3. Descargas “naturales”. Son entendidas como aquellas porciones de material que caen desde la galería Dozer al Panzer en un lapso de tiempo que se encuentra fuera del ciclo de activación correspondiente. Su frecuencia de ocurrencia es baja (4,3% equivalente a 19 eventos de un total de 444 registrados). Los datos de descargas “naturales” y nulas son eliminados de la base de 444 iniciales, quedando los 400 utilizados posteriormente.
4. Descargas nulas o sin material. Tras cada descarga se reporta el caso en que no exista material que pesar. Al igual que en el caso de descargas “naturales” existe una baja frecuencia (5,6% equivalente a 25 eventos).
5. Se verifica que tanto para el avance como el retroceso del Dozer existe flujo de material desde el punto de extracción.



Figura 4.1. Colgadura presenciada en Experimento 2.1: (Izquierda) Vista desde costado de batea y galería Dozer; (Derecha) Vista frontal del punto de extracción



Figura 4.2. Colgaduras en puntos de extracción: (Izquierda) Vista posterior de colgadura a nivel de batea en punto de extracción; (Derecha) Vista frontal de colgadura a nivel de batea en punto de extracción

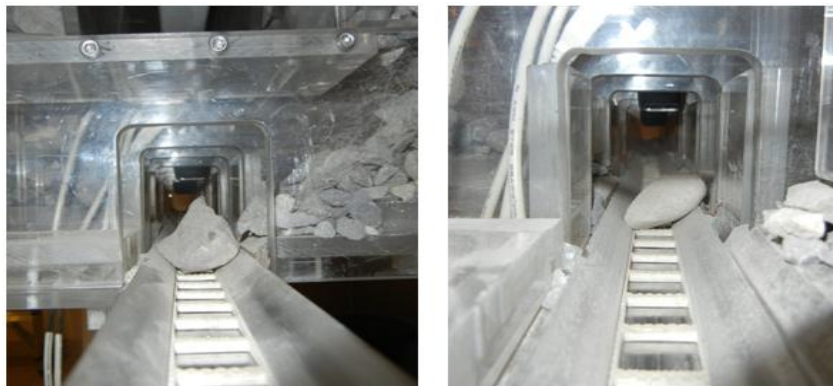


Figura 4.3. Evento de rocas estables sobre cuñas inclinadas del Panzer

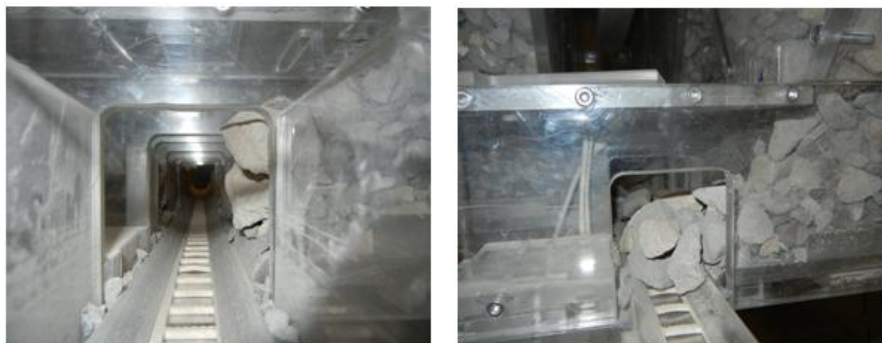


Figura 4.4. Colpas o sobre-tamaños en sistema: (Izquierda) Colpa a la salida de un punto de extracción; (Derecha) Descarga con material grueso

b) **Cuantitativos:** Se registra el largo y masa de cada descarga, 50 veces por cada Dozer.

La Tabla 4.4 resume los parámetros estadísticos de mayor interés. Las Figuras 4.5 y 4.6 presentan los histogramas para el caso a escala mina.

Tabla 4.4. Resultados de estadísticas de largos y masas de descargas de Dozer⁴

	Escala Laboratorio		Escala Real	
	Largo Descarga [cm]	Productividad Dozer [gr/ciclo]	Largo Descarga ⁵ [m]	Productividad Dozer ⁶ [t/ciclo]
Media	19,18	76,35	9,59	9,54
Desviación estándar	9,76	74,38	4,88	9,29
Mínimo	0,50	0,25	0,25	0,03
Máximo	50,50	423,72	25,25	52,97
Coefficiente de variación ⁷	50,89	97,42	50,89	97,42
Número de ciclos	400	400	400	400

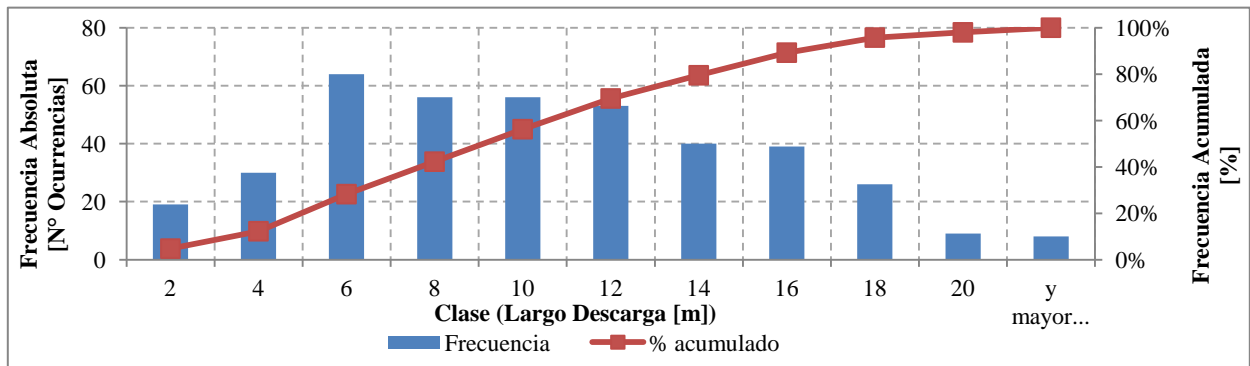


Figura 4.5. Histograma de datos de largos de descarga Dozer en escala real

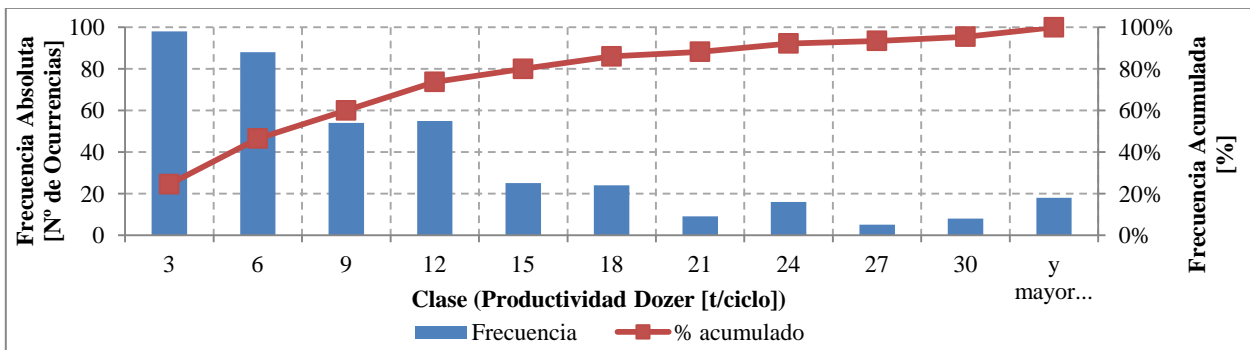


Figura 4.6. Histograma de productividades de Dozer en escala real

⁴ Estadísticas se muestran para 400 datos de descargas con material medible, es decir, se descartan los 44 eventos de descargas “naturales” y descargas nulas

⁵ Parámetro en escala real considerando el factor de escalamiento $\lambda = 0,02$

⁶ Valor no se encuentra escalado por el factor de escala para la densidad k_p . Se considera $k_p = 1$ (Orellana, 2012)

⁷ Coeficiente de variación (desviación estándar sobre la media de los datos) expresada en porcentaje

En cuanto a los parámetros de las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan según test estadístico de chi cuadrado y confianza del 95%, la Tabla 4.5 muestra dichos resultados.

Tabla 4.5. Parámetros de distribuciones de probabilidad con mejor ajuste a datos medidos

Variable	Distribución con mejor ajuste	Parámetros de Distribución
Largo de Descarga de Dozer [m]	Weibull	<i>mínimo</i> = 0; $\alpha = 2,03$; $\beta = 10,8$
Productividad de Dozer [t/ciclo]	Exponencial	<i>mínimo</i> = 0; $\beta = 9,54$

Se tiene que para el caso de la distribución Weibull, $\alpha > 0$ corresponde a un parámetro de forma y $\beta > 0$ un parámetro de escala. Para el caso de la distribución Exponencial, $\beta > 0$ es un parámetro de escala (la media).

Cabe destacar que para la medición de los largos de descarga, se considera la extensión del Panzer utilizada entre la primera y la última roca de la descarga, incluyendo potenciales vacíos que pudieran existir entre tales extremos (Figura 4.7). También se hace omisión del perfil del material en el eje vertical Z del Panzer, es decir, se considera sólo la porción en el plano XY que contenga material. Asociado a esto último, se identificaron variados comportamientos del material a lo largo de la descarga (Figura 4.8), pudiendo existir los siguientes casos:

- (1) Tramos uniformes con material, donde tanto en planta como perfil se aprecia una continuidad del llenado del Panzer en el largo de la descarga.
- (2) Tramos con una separación pronunciada entre porciones de material.
- (3) Largos de descarga con material de menor tamaño ocupando una extensión considerable del Panzer, produciendo una reducción de la razón entre la masa de la descarga y su largo respectivo.
- (4) Tramos que contemplan combinaciones de algunos de los casos anteriores.

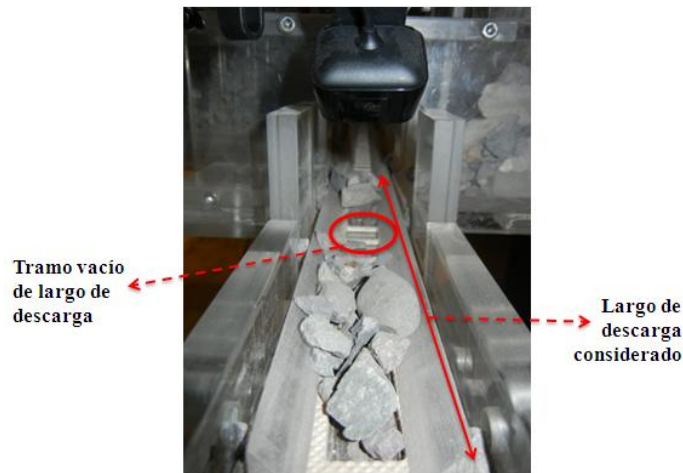


Figura 4.7. Largo de descarga en Panzer

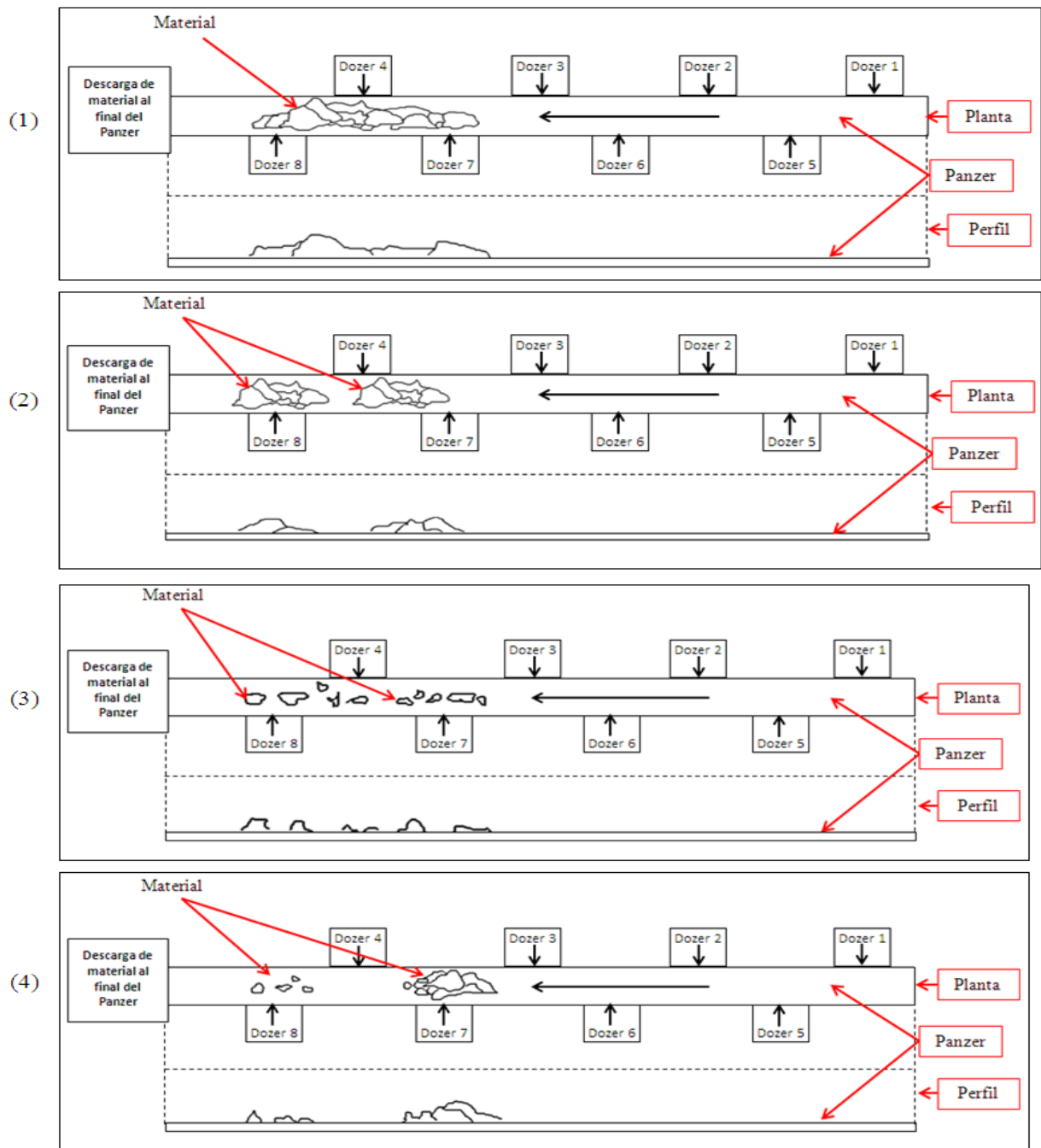


Figura 4.8. Plantas y perfiles de distribuciones del material presenciadas en Experimento 2.1: (1) Distribución con material uniforme; (2) Distribución segregada; (3) Distribución diluida; (4) Distribución mixta

Asociado a los resultados cualitativos se observa que existe descarga de material tanto en el avance como en el retroceso del Dozer. Además, se aprecia la ocurrencia de sobre-tamaños que podrían generar atascamientos y saturación del Panzer al impedir el avance del flujo de material.

De los resultados mostrados en las Tabla 4.4, se deduce una gran variabilidad del sistema en cuanto a su productividad y posibles acoples entre descargas, siendo esto último representado por la aleatoriedad de los largos de las descargas.

4.3.3 Experimento 2.2

Experimento de caracterización del sistema de extracción Dozer – Panzer para la Granulometría G2. La modificación de la granulometría desde la G1 (Experimento 2.1) a la G2 implica un aumento en un 22% del tamaño de partícula d_{50} ($d_{50} = 15,9$ mm para G1 y $d_{50} = 19,4$ mm para G2), por lo que aquí y en las experiencias posteriores se busca cuantificar el impacto de una fragmentación más gruesa tanto en la productividad como en la utilización del sistema de Minería Continua.

En esta experiencia se sigue el mismo procedimiento del Experimento 2.1, esta vez aplicado a la Granulometría G2.

Los resultados cualitativos emanados concuerdan con los del Experimento 2.1 en cuanto a colpas, rocas que quedan estables sobre Panzer y colgaduras. Asociado al primer evento, la Figura 4.9 muestra dos ejemplos de materiales de gran tamaño presenciados en las pruebas. Dicho material excede en su longitud máxima el $d_{100} = 50,8$ mm de la granulometría G2, por lo que posiblemente haya pasado por su dimensión menor a través de los harneros respectivos.

Asociado a los resultados cuantitativos, se tienen 50 mediciones de largos de descarga y productividades por cada Dozer. La Tabla 4.6 resume las estadísticas principales de la caracterización. En las Figuras 4.10 y 4.11 se aprecian los histogramas de los datos.

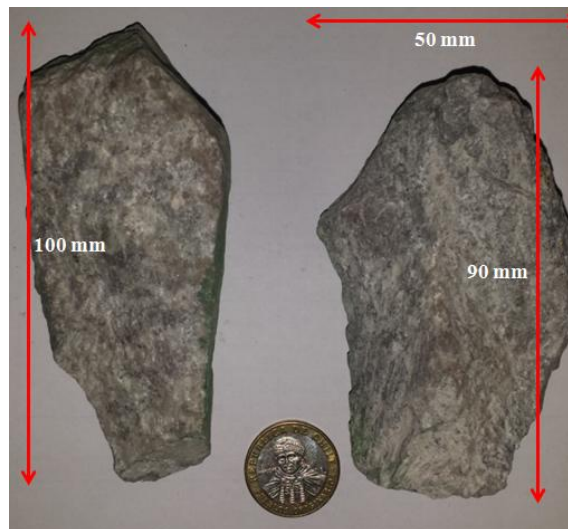


Figura 4.9. Sobre tamaños presenciados en caracterización del sistema Dozer – Panzer para Granulometría G2

Los parámetros de las distribuciones de probabilidad ajustadas a los datos de este experimento se muestran en la Tabla 4.7. Cabe destacar que para el caso del largo de descarga Dozer, ningún ajuste resultó aceptado de acuerdo a los test estadísticos efectuados. Luego, se presenta la distribución de Erlang ya que a pesar de ser rechazada, es la que más se aproxima a los datos. En cuanto a los parámetros de tal distribución, m corresponde a un factor de forma entero y positivo y β es un factor de escala positivo.

Tal como en el caso de la Granulometría G1, se evidencia una gran variabilidad en cuanto a productividad y largos de descarga de los equipos Dozer, concluyendo la necesidad de emplear distribuciones de probabilidad para su entendimiento, evitando así el asumir un valor constante.

Tabla 4.6. Resultados de estadísticas de largos y masas de descargas de Dozer para Experimento 2.2

	Escala Laboratorio		Escala Real	
	Largo Descarga [cm]	Productividad Dozer [gr/ciclo]	Largo Descarga [m]	Productividad Dozer [t/ciclo]
Media	16,57	79,90	8,29	9,99
Desviación estándar	8,18	62,17	4,09	7,77
Mínimo	2,00	2,06	1,00	0,26
Máximo	59,00	340,02	29,50	42,50
Coefficiente de variación	49,36	77,80	49,36	77,80
Número de ciclos	400	400	400	400

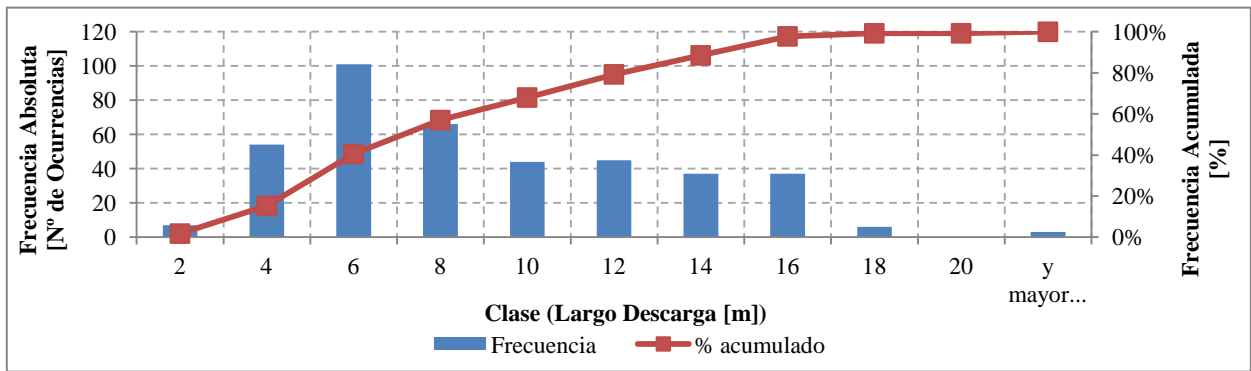


Figura 4.10. Histograma de datos de largos de descarga Dozer en escala real para Experimento 2.2

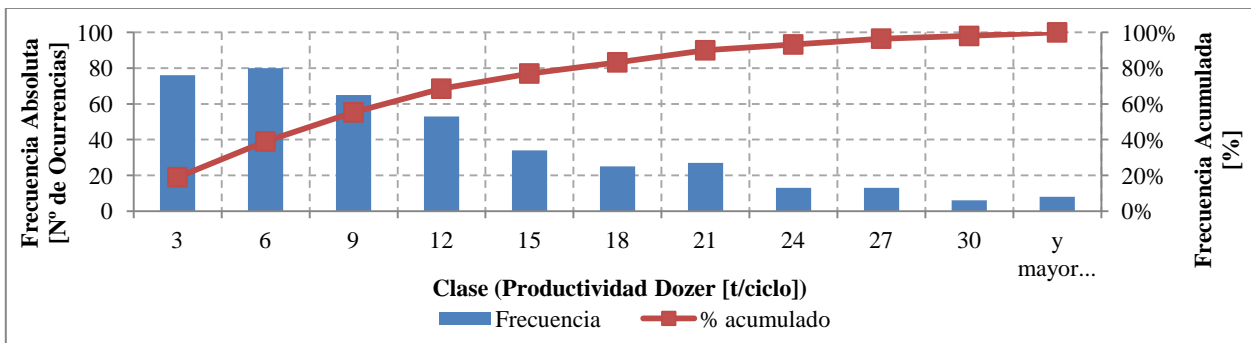


Figura 4.11. Histograma de productividades de Dozer en escala real para Experimento 2.2

Tabla 4.7. Parámetros de distribuciones de probabilidad con mejor ajuste a datos medidos para Experimento 9

Variable	Distribución con mejor ajuste	Parámetros de Distribución
Largo de Descarga de Dozer [m]	Erlang	$mínimo = 0; m = 4; \beta = 2,07$
Productividad de Dozer [t/ciclo]	Weibull	$mínimo = 0; \alpha = 1,31; \beta = 10,8$

4.3.4 Experimento 3

Experimento de caracterización del sistema Dozer – Panzer usando la Granulometría G1, cuyo objetivo es estudiar la interacción de descargas de Dozer con material ya disponible sobre el transportador Panzer. Se busca establecer las consecuencias de efectuar dichas descargas.

4.3.4.1 Procedimiento

1. Selección de material granular a conformar la descarga inicial conocida ya disponible en el Panzer.
2. Medición de masa y ubicación en Panzer de material seleccionado en punto anterior (Figura 4.12). La ubicación del material está condicionada a que sea aguas arriba del Dozer bajo estudio.
3. Activación de Panzer a velocidad de 2,12 cm/s (9 m/min a escala real).
4. Descarga individual de Dozer bajo estudio en instante en que la porción de material insertado inicialmente queda enfrentada al Dozer. Tiempo de ciclo de Dozer fijo en 16 s (2 min a escala real).
5. Observación y registro de evolución del material a lo largo del Panzer.

El proceso anterior se lleva a cabo 10 veces por cada uno de los 8 Dozer, lo que resulta en un total de 80 datos disponibles.



Figura 4.12. (Izquierda) Vista en perspectiva de un ejemplo de material inicial empleado en pruebas de Experimento 3; (Derecha) Vista lateral de un ejemplo de material inicial empleado en pruebas de Experimento 3

4.3.4.2 Resultados

Para este experimento se tienen los siguientes resultados cualitativos:

1. El material extraído por la galería Dozer y que se enfrenta con descargas anteriores, se reacomoda a través del roce con el material y las paredes, pudiendo arrastrarse para establecerse hacia el final de la descarga total.
2. Existe un constante reordenamiento/reacomodo del material en el Panzer a lo largo de la galería de producción debido al roce con las paredes, interacción entre partículas e interacción con eslabones de arrastre.

3. De existir espacios en la descarga inicial, el material de la nueva descarga se distribuye en dichos intersticios.
4. Material descargado tiende a frenar por instantes el material previo del Panzer, generando una saturación de material e incrementando la altura del mismo en ciertos tramos del Panzer. El motivo puede estar asociado a que material de menor fragmentación migra entre las rocas y tiende a depositarse en el fondo, ocasionando el roce excesivo con el fondo del transportador Panzer (placa fija) lo que podría provocar consecuencias negativas desde el punto de vista operacional, ya que se tendría una irregularidad del llenado del Panzer en su extensión.
5. El material de la descarga Dozer permanece sobre la carga inicial de Panzer por cierto instante de tiempo, alcanzando una mayor altura. En algunos casos, el material de la descarga se reacomoda sobre el material inicial, alcanzando una altura cercana a la altura de la galería Panzer (Figura 4.13). Lo anterior ocurre cuando existen fragmentos de roca de tamaño considerable, tanto en la descarga inicial como en la efectuada por el Dozer, lo que deriva en que permanezcan estables unas sobre las otras, sin mayores reacomodos.

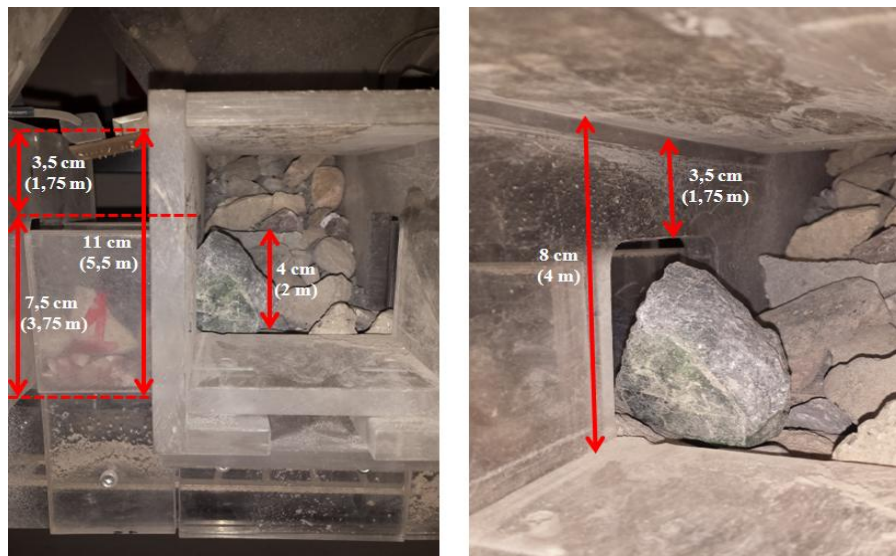


Figura 4.13. Caso crítico de altura alcanzada por material granular sobre Panzer: (Izquierda) Vista frontal de galería Dozer con material descargado; (Derecha) Vista en perspectiva de material descargado. Valores entre paréntesis corresponden a valores a escala real

6. Rocas de tamaño considerable caen sobre carga inicial del Panzer, formando arcos contra la pared de la galería de producción. Lo anterior podría conllevar a saturaciones de material en caso de experiencias posteriores, ya que se impediría el paso del material proveniente aguas arriba.
7. Durante los experimentos se observó que el material en el Panzer podía en ciertos casos arrastrar material contenido en la galería Dozer. Esto, a pesar que el Dozer no estaba en funcionamiento.

De los puntos anteriores, se concluye que es posible efectuar descargas Dozer sobre material disponible en el Panzer. Para lo anterior se debe tener en consideración las consecuencias de efectuar dichas descargas, las que podrían impactar negativamente en la operación, así como en infraestructura instalada a lo largo de la galería de producción.

4.3.5 Experimento 4

Corresponde a un experimento de operación del Sistema de Minería Continua sin automatización. No se efectúa descuelgue de zanjas que presenten estado de colgadura. Adicionalmente, se contempla un máximo de cuatro (4) Dozer operativos simultáneos.

El objetivo primordial de este experimento es estudiar y estimar la productividad y utilización del equipo Panzer para diferentes configuraciones de operación y ambas granulometrías (G1 y G2).

Las etapas que conforman esta experiencia son:

1. Determinación de configuraciones principales de operación, esto es, Dozer activos durante un turno considerando restricciones de simultaneidad (cuatro Dozer como máximo) y vecindad (incompatibilidad de operación simultánea de Dozer adyacentes).
2. Secuenciamiento de Dozer por cada configuración: se emplean los largos medios de descarga de los Experimentos 2.1 y 2.2, así como la velocidad del Panzer y las distancias entre las galerías Dozer de los equipos activos en la configuración escogida.
3. Obtención de estado estacionario del sistema: determinación del número de ciclos consecutivos del sistema que permiten llegar a un estado estacionario de material sobre el Panzer.
4. Operación de configuraciones principales: se realizan las pruebas del sistema de Minería Continua, obteniendo resultados de productividad y utilización.

Dado que se trata de un experimento sin intervención o descuelgue de los puntos de extracción afectados por interferencias operacionales, se espera obtener resultados más conservadores por cuanto se seguiría la estrategia planteada en la revisión bibliográfica: si un punto de extracción se cuelga durante un turno, se deja en ese estado, reanudando su flujo en el turno posterior.

4.3.5.1 Configuraciones de Operación/Modo de Operación

En términos de los alcances de este trabajo de tesis, son seleccionadas y estudiadas tres configuraciones principales de operación. Éstas son denominadas como: Tipo I, Tipo II y Tipo III, y son escogidas por cuanto generan a partir de simetrías, de traslaciones o bien de combinaciones entre ellas, las potenciales configuraciones restantes que podrían existir considerando el cumplimiento de las restricciones de Dozer adyacentes y máximo cuatro activos simultáneos (Figuras 4.14 a 4.16). Como es posible apreciar, se consideran dos turnos al día para

la calle de producción: Turno A y Turno B. En este caso se señalan las unidades de actuación como bombas hidráulicas, haciendo alusión al tipo de sistema que se implementaría en el módulo de prueba industrial en División Andina.

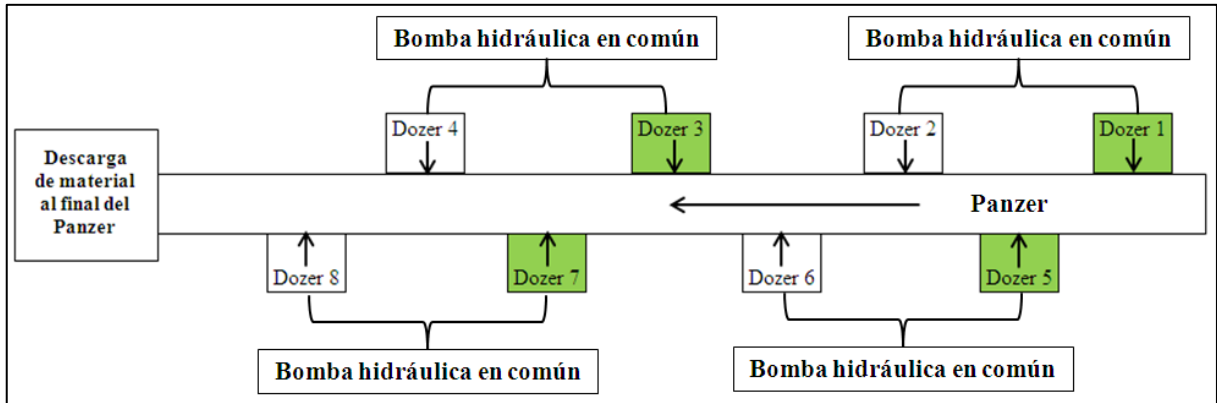


Figura 4.14. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo I: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco).

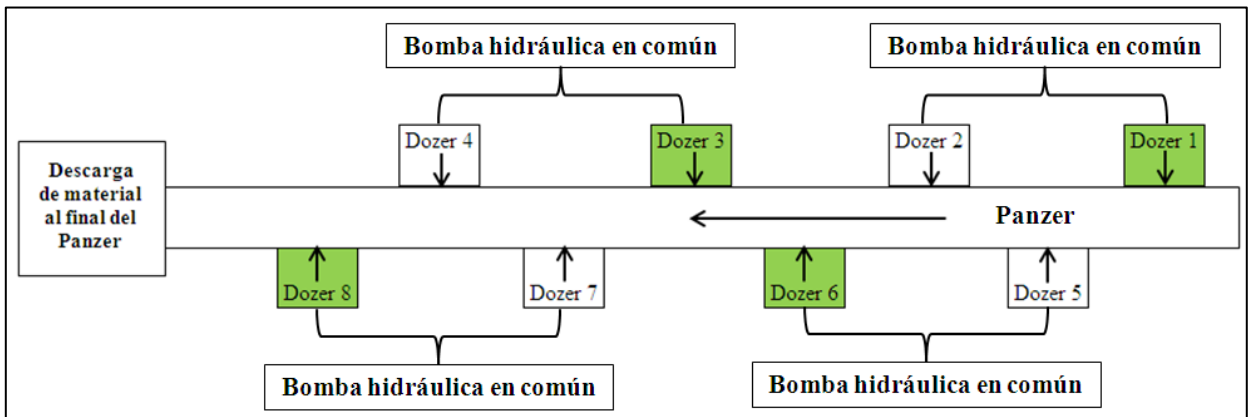


Figura 4.15. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo II: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco).

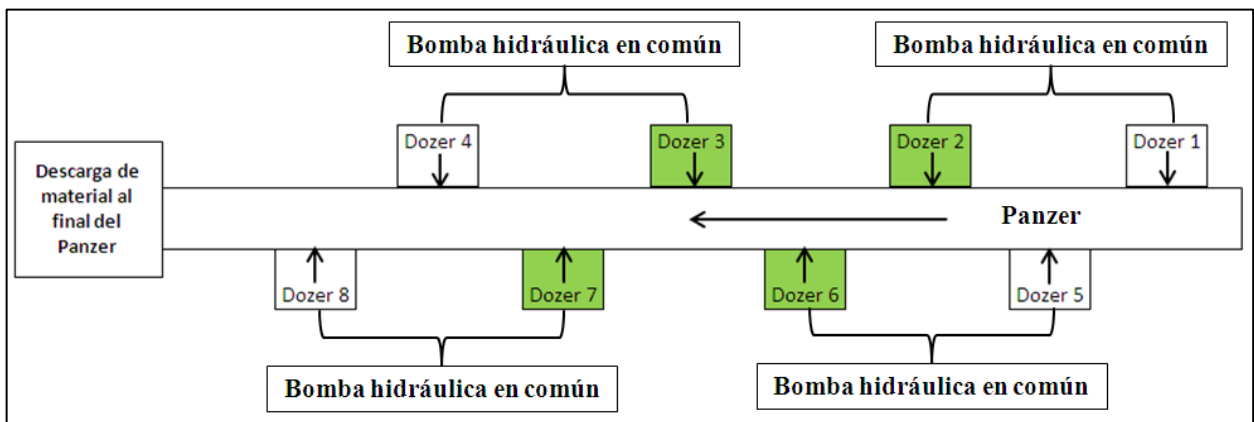


Figura 4.16. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de configuración principal Tipo III: Turno A (Dozer en verde) y Turno B (Dozer en blanco).

4.3.5.2 Generación de Secuenciamiento

En esta etapa del Experimento 4 se genera el secuenciamiento para las configuraciones principales de operación. Dicho secuenciamiento consiste en la asignación de desfases temporales de activación de los Dozer operativos durante un turno, los cuales se someten a las siguientes restricciones operacionales (Barriga, 2012):

- Respetar el ciclo de trabajo de cada Dozer.
- Evitar rebalses del Panzer.

De esta manera, para el caso de las pruebas de pilotaje, el ciclo de trabajo de los Dozer será de ocho segundos de avance y ocho segundos de retroceso (dos minutos de avance y dos minutos de retroceso a escala real, respectivamente).

La segunda restricción se cumple al tener en cuenta los largos de las descargas de los Dozer, buscando evitar que las descargas se efectúen sobre alguna preexistente en el Panzer. Esto último se emplea como criterio de secuenciamiento basándose en los resultados del Experimento 3. En tal experimento es posible apreciar la ocurrencia de eventos críticos en cuanto a alturas potenciales del material granular en Panzer, lo cual deriva como consecuencia de la activación de descargas Dozer enfrentándose a alguna previa en el Panzer. Es por ello que se pretende evitar dichos eventos que perjudiquen el buen desarrollo de las pruebas experimentales.

El algoritmo llevado a cabo para determinar el desfase en tiempo que debiese existir entre las descargas de los Dozer que componen una configuración de operación se detalla en el Anexo G. Finalmente, se procede a normalizar los desfases por el respectivo tiempo de ciclo global (intervalo de tiempo existente entre descargas de un mismo Dozer posterior a iniciada la secuencia).

4.3.5.3 Obtención de Estado Estacionario

Una vez obtenidos los desfases temporales normalizados de los Dozer para cada configuración, es decir, los secuenciamientos a implementar de manera reiterativa en las pruebas piloto del sistema de Minería Continua, se procede a determinar el número de ciclos consecutivos del sistema que permiten llegar a un estado estacionario de material sobre el Panzer. El objetivo de esta etapa es dimensionar cuánto tiempo le toma al sistema llegar a un régimen de utilización del Panzer aproximadamente constante.

Para cumplir con el objetivo propuesto, se escoge cada una de las configuraciones y se inician los secuenciamientos sin un tiempo límite.

Transcurrido cierto tiempo y finalizadas las pruebas, se estima que con dos ciclos globales consecutivos (73 segundos a escala laboratorio y 8,5 min a escala real, en promedio para Granulometría G1; 63 segundos a escala laboratorio y 7,4 min a escala real, en promedio para Granulometría G2) el sistema se comporta de manera permanente, evitando los vacíos iniciales originados como consecuencia de la activación de un único ciclo global de operación (cada Dozer

de la configuración descarga una única vez). En este último caso, debido a que los desfases están normalizados, podía ocurrir que el primer Dozer en descargar estuviera muy alejado de la descarga del segundo, quedando espacios vacíos que son llenados al llegar al estado estacionario de acople del sistema (para dos ciclos en adelante).

4.3.5.4 Estimación de la utilización del Panzer

Junto a la productividad del sistema, el segundo parámetro clave medido a lo largo de las pruebas de pilotaje corresponde a la utilización. Para calcularla, se procede usando la extensión total ocupada por el material en el Panzer, es decir, desde la primera a la última roca, restando los espacios vacíos que pudiesen existir. Luego, la utilización se define mediante la Ecuación 4.1 (Figura 4.17):

$$U_p [\%] = \frac{(L_p - n)}{L_p} * 100, \quad \text{para } n \in N \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde U_p es la utilización del Panzer medida como porcentaje, L_p es el largo ocupado por el material en el Panzer (desde la primera a la última roca) y n la distancia ocupada por el total de vacíos contenidos en los límites que conforman la primera y última roca visualizada a lo largo del Panzer. En particular, para el caso de la Figura 4.17, m_1 y m_2 indican tramos del Panzer que contienen vacíos tales que $m_1 + m_2 = n$.

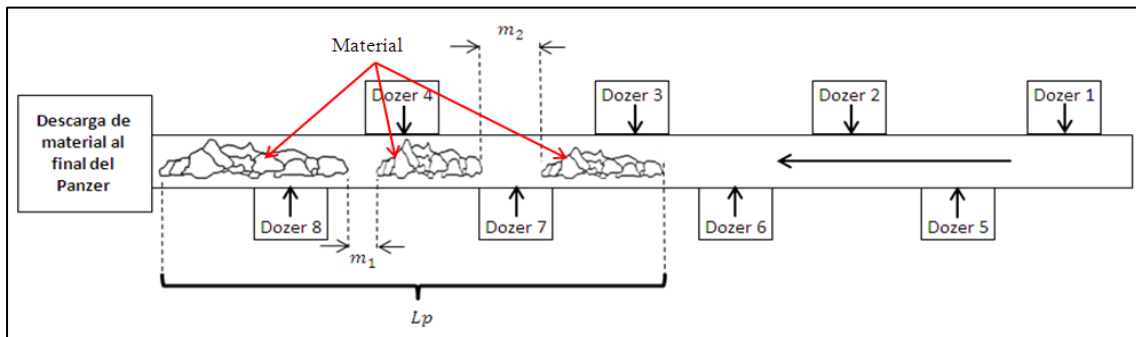


Figura 4.17. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para el cálculo de la utilización

4.3.5.5 Procedimiento de Operación

Una vez finalizadas las etapas anteriores se puede dar inicio a las pruebas del Sistema de Minería Continua. El procedimiento llevado a cabo se lista a continuación:

1. Selección de configuración de operación del sistema a activar y su turno respectivo.
2. Generación de secuenciamiento y asignación de los desfases temporales fijos entre las descargas de los Dozer activos de la configuración escogida.
3. Activación de Panzer a velocidad de 2,12 cm/s (equivalente a 9 m/min a escala real).
4. Inicialización de prueba con medición de producción del sistema al final del Panzer cada 5 min.
5. Medición de vacíos (espacios entre eslabones del Panzer) sin material al final del Panzer (entre la salida de la galería del Dozer 8 y la descarga al final del Panzer) para cálculo de utilización.

6. Término de prueba a los 15 min (equivalentes a 1,8 h a escala real).
7. Registro de productividad y utilización.
 - a. La productividad es la suma de los gramos de material extraídos para 5 min, 10 min y 15 min. Se escalan los gramos a toneladas y se extrapola la productividad a un total de 6 horas reales (tiempo del turno asumido).
 - b. La utilización se calcula usando el número total de vacíos y el largo teórico estimado entre la primera y la última roca en salir del Panzer (Ecuación 4.2):

$$Lp = \frac{t_{final} - t_{inicial}}{v_p} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde $t_{inicial}$ es el tiempo registrado cuando sale la primera roca del sistema, t_{final} corresponde a los 15 min de duración de cada prueba y v_p es la velocidad del Panzer.

8. Realización de puntos 1 a 7 esta vez para turno complementario.

El proceso anterior se replica tres veces por cada turno al operar con la Granulometría G1 y una vez al operar con la Granulometría G2.

4.3.5.6 *Resultados de Operación*

En este segmento se plantea ejecutar las pruebas sin descolgar los puntos de extracción que resulten afectados por interferencias de este tipo. Así, se plasma un escenario de operación conservador, en donde los puntos afectados sólo son intervenidos una vez finalizado el turno respectivo (caso a implementar en prueba industrial en División Andina).

La Tabla 4.8 resume los resultados obtenidos en este experimento, estableciendo los potenciales productivos que sustentan los fundamentos de la planificación de extracción a corto plazo del sistema de Minería Continua. La utilización global se presenta como el promedio diario entre las utilidades de los turnos A y B de la configuración escogida. Para el caso de la Granulometría G2, se realizan pruebas respecto de la configuración que obtuvo una mayor productividad al operar con la Granulometría G1, esto es, la Tipo III.

En la Tabla 4.8 se plantean las estadísticas por granulometría y para el total de los datos (G1 y G2). Es posible concluir la significancia que tiene en la productividad y utilización del sistema un incremento en un 22% del tamaño medio de las partículas. Lo anterior impacta en una reducción de aproximadamente un 45% de la productividad diaria al operar bajo la configuración Tipo III. Por su parte, la utilización disminuye desde un 84% a un 63% (también para la configuración Tipo III). Las velocidades de extracción alcanzadas son calculadas en función del área en régimen de la calle de producción considerando ocho puntos de extracción (1.768 m²). Se concluye en base a este parámetro el cumplimiento de las metas productivas para el caso de la Granulometría G1, con valores sobre 3 t/día/m². Por otro lado, al operar bajo Granulometría G2 no es posible alcanzar las velocidades de extracción previstas.

Es necesario hacer notar que todo resultado mostrado en este capítulo y en el próximo se ha obtenido únicamente de lo reflejado a través de las pruebas de pilotaje. Esto implica que no se ha incluido ningún castigo por disponibilidad mecánica de los equipos ni de frecuencia de interferencias operacionales y sus consecuentes efectos sobre el tiempo efectivo de operación.

Tabla 4.8. Resultados de productividades y utilizaciones de Sistema de Minería Continua bajo modalidad de operación sin descuelgue de zanjas. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Config.	Turno	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]	Utilización Global [%]
G1	Tipo I	A	519	3.114	6.762	3,8	87	83,5
		B	608	3.648			80	
	Tipo II	A	503	3.018	7.098	4,0	84	86,5
		B	680	4.080			89	
	Tipo III	A	724	4.344	7.170	4,1	89	84
		B	471	2.826			79	
	Promedio		584	3.505	7.010	4,0	85	85
	Desviación Estándar		103	617	218	0,1	4	2
	Mínimo		471	2.826	6.762	3,8	79	84
	Máximo		724	4.344	7.170	4,1	89	87
G2	Tipo III	A	207	1.242	3.948	2,2	52	63
		B	451	2.706			74	
	Promedio		329	1.974	-	-	63	-
	Desviación Estándar		173	1.035	-	-	16	-
	Mínimo		207	1.242	-	-	52	-
	Máximo		451	2.706	-	-	74	-
	Promedio		520	3.122	6.245	3,5	79	79
G1 y G2	Desviación Estándar		161	963	1.541	0,9	12	11
	Mínimo		207	1.242	3.948	2,2	52	63
	Máximo		724	4.344	7.170	4,1	89	87

4.3.6 Experimento 5

Este experimento consiste en realizar, bajo el mismo procedimiento, las experiencias del Experimento 4, pero esta vez incorporando el descuelgue automático/inmediato de las zanjas. Se busca verificar el potencial extractivo máximo del sistema de Minería Continua considerando que siempre hay material disponible en el punto de extracción, o bien, que las colgaduras son resueltas de manera inmediata sin tener que esperar a un turno siguiente ni detener la operación para resolverlas. La Tabla 4.9 resume los resultados obtenidos tras la operación del sistema.

De la Tabla 4.9 se deduce que al intervenir el sistema mediante el descuelgue de los puntos de extracción, el efecto de una granulometría más gruesa se ve inhibido. En efecto, es posible deducir un incremento en un 7% de la productividad al operar con la Granulometría G2 en

relación a la G1 (caso de configuración Tipo III). Esto tiene sentido si se toma en cuenta que la Granulometría G2, al poseer material más grueso, estaría aportando con flujos de mayor masa por cada ciclo Dozer. Por otro lado, la utilización decae desde un 93,5% a un 92%, un margen menor considerando que al no descolgar los puntos de extracción se tenía una disminución de casi un 20% (caso Experimento 4).

En relación a las velocidades de extracción para este escenario idealizado, en donde existe un descuelgue inmediato de los puntos de extracción sin detención de la operación, los valores alcanzados por el sistema llegan a estar por sobre 5 t/día/m², superando de esta manera en un 40% la meta productiva planteada inicialmente. Luego, se concluye el gran impacto que tendría en el desarrollo de la prueba industrial un sistema o estrategia de descuelgue de zanjas que satisficiera las características mencionadas: inmediato y sin intervención o detención de los equipos de extracción.

Tabla 4.9. Resultados de productividades y utilizaciones de Sistema de Minería Continua bajo modalidad de operación con descuelgue de zanjas. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Config.	Turno	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]	Utilización Gobal [%]	
G1	Tipo I	A	675	4.050	8.532	4,8	93	94	
		B	747	4.482			95		
	Tipo II	A	669	4.014	9.096	5,1	91	94	
		B	847	5.082			97		
	Tipo III	A	771	4.626	8.262	4,7	96	93,5	
		B	606	3.636			91		
	Promedio			719	4.315	8.630	4,9	94	94
	Desviación Estándar			86	517	426	0,2	3	0,3
	Mínimo			606	3.636	8.262	4,7	91	94
	Máximo			847	5.082	9.096	5,1	97	94
G2	Tipo III	A	711	4.266	8.820	5,0	93	92	
		B	759	4.554			91		
	Promedio			735	4.410	-	-	92	-
	Desviación Estándar			34	204	-	-	1	-
	Mínimo			711	4.266	-	-	91	-
	Máximo			759	4.554	-	-	93	-
G1 y G2	Promedio		723	4.339	8.678	4,9	93	93	
	Desviación Estándar		74	446	360	0,2	2	1	
	Mínimo		606	3.636	8.262	4,7	91	92	
	Máximo		847	5.082	9.096	5,1	97	94	

4.3.7 Experimento 6

Esta etapa tiene como objetivo estudiar la sensibilidad de la productividad y utilización del Panzer en cuanto al incremento del número máximo de Dozer operativos simultáneos por turno. Lo anterior se traduce en operar 5, 6, 7 y hasta el total de 8 Dozer de la calle de producción disponible, suponiendo que en el caso a escala real existiera una unidad hidráulica por Dozer. En este experimento no se efectúa descuelgue de zanjas.

La elección de los Dozer activos utiliza como base la configuración más productiva del Experimento 4, es decir, la principal de Tipo III (Dozer 2, 3, 6 y 7 operativos). Las Figuras 4.18 a 4.20 muestran los Dozer escogidos para cada caso. Se omite una figura para caso de 8 Dozer ya que es directo que todos los Dozer resultan activos. Además, en ambos turnos diarios (A y B) operan los mismos Dozer, por lo que la utilización global es igual a la del turno.

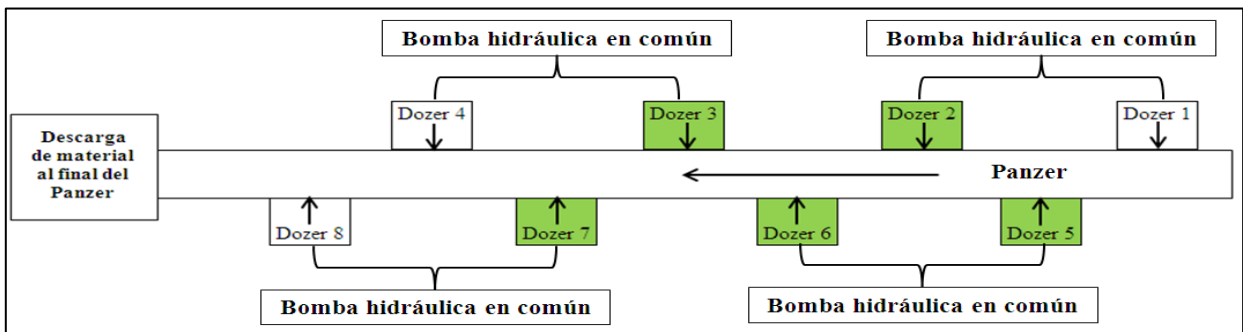


Figura 4.18. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de operación con 5 Dozer simultáneos. Dozer en verde indican los Dozer operativos durante las pruebas realizadas

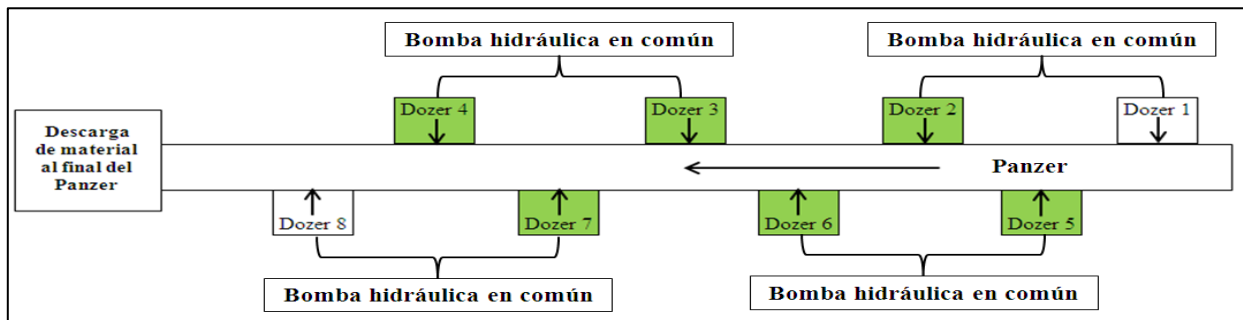


Figura 4.19. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de operación con 6 Dozer simultáneos. Dozer en verde indican los Dozer operativos durante las pruebas realizadas

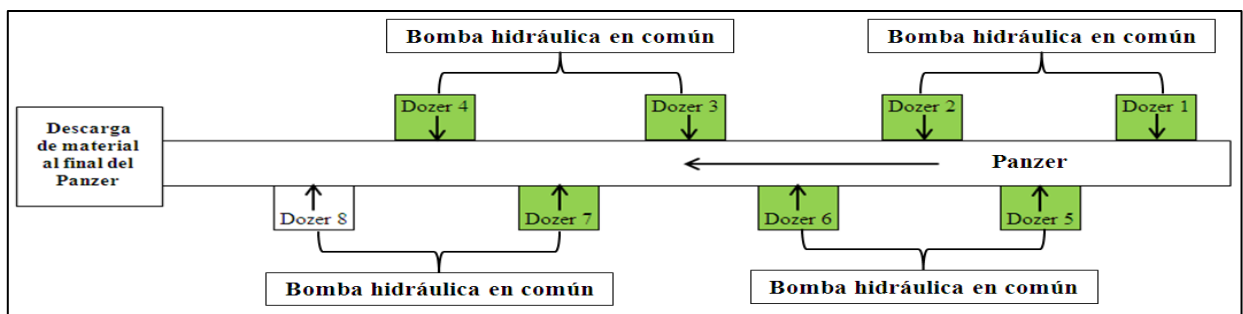


Figura 4.20. Esquema de vista en planta de calle de producción Panzer para caso de operación con 7 Dozer simultáneos. Dozer en verde indican los Dozer operativos durante las pruebas realizadas

El procedimiento seguido es idéntico al de los Experimentos 4 y 5, esta vez aumentando los Dozer activos simultáneos y los respectivos desfases de tiempo (ver Tabla G.3 en Anexo G).

De los resultados de la Tabla 4.10, se identifica una reducción en la productividad promedio de un 24% al operar bajo una Granulometría G2, mientras que la utilización promedio decae desde un 89% a un 79%. De los resultados expuestos se concluye una tendencia al incremento tanto de la productividad como de la utilización, para cuando se procede a utilizar un número mayor de Dozer operativos. Asimismo, se aprecia que la mayor productividad corresponde al caso en que se emplean el total de los Dozer de la calle de producción (8). Pese a lo anterior, la evaluación de implementar o no una estrategia de unidades de actuación independientes (una para cada Dozer) debiera considerar no sólo el potencial productivo, sino que también los costos e inversiones adicionales asociados a esta implementación.

Se concluye que un incremento en el número de Dozer operativos simultáneos por calle de producción Panzer permite alcanzar velocidades de extracción sobre 3 t/día/m². Junto a esto, se observa que, en caso de enfrentarse a una Granulometría G2, es posible llegar a tasas sobre esta meta productiva si es que operan simultáneamente al menos 6 Dozer.

Tabla 4.10. Resultados de productividades y utilizaciones de Experimento 6 en Sistema de Minería Continua bajo modalidad de operación sin descuelgue. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Número Dozer Operativos	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]
G1	5	624	3.744	7.488	4,2	91
	6	606	3.636	7.272	4,1	89
	7	572	3.432	6.864	3,9	87
	8	664	3.984	7.968	4,5	90
	Promedio	617	3.699	7.398	4,2	89
	Desviación Estándar	38	230	460	0,3	2
	Mínimo	572	3.432	6.864	3,9	87
	Máximo	664	3.984	7.968	4,5	91
G2	5	300	1.800	3.600	2,0	67
	6	517	3.102	6.204	3,5	83
	7	500	3.000	6.000	3,4	82
	8	551	3.306	6.612	3,7	85
	Promedio	467	2.802	5.604	3,2	79
	Desviación Estándar	113	680	1.360	0,8	8
	Mínimo	300	1.800	3.600	2,0	67
	Máximo	551	3.306	6.612	3,7	85
G1 y G2	Promedio	542	3.251	6.501	3,3	84
	Desviación Estándar	112	671	1.343	0,8	8
	Mínimo	300	1.800	3.600	2,0	67
	Máximo	664	3.984	7.968	4,5	91

4.3.8 Experimento 7

Este experimento es idéntico al Experimento 6, salvo que aquí se realiza el descuelgue de las zanjas de manera inmediata. La Tabla 4.11 presenta los resultados obtenidos. Se concluye que al generar una intervención constante del sistema mediante descuelgue de los puntos de extracción, la productividad y utilización no presentan mayores cambios en cuanto al tipo de granulometría gobernante en la operación. En efecto, la productividad disminuye sólo un 3% en promedio al pasar de G1 a G2, mientras que la utilización baja de un 95 a un 94%.

En cuanto al efecto sobre las velocidades de extracción, se observa que en este caso superan las 4 t/día/m², incluso al usar 5 Dozer y estar en condiciones de una Granulometría G2.

Tabla 4.11. Resultados de productividades y utilizaciones de Experimento 7 en Sistema de Minería Continua bajo modalidad de operación con descuelgue. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Número Dozer Operativos	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]
G1	5	679	4.074	8.148	4,6	95
	6	825	4.950	9.900	5,6	96
	7	836	5.016	10.032	5,7	96
	8	723	4.338	8.676	4,9	94
	Promedio	766	4.595	9.189	5,2	95
	Desviación Estándar	77	462	924	0,5	1
	Mínimo	679	4.074	8.148	4,6	94
	Máximo	836	5.016	10.032	5,7	96
G2	5	618	3.708	7.416	4,2	90
	6	764	4.584	9.168	5,2	96
	7	750	4.500	9.000	5,1	93
	8	839	5.034	10.068	5,7	97
	Promedio	743	4.457	8.913	5,0	94
	Desviación Estándar	92	551	1.103	0,6	3
	Mínimo	618	3.708	7.416	4,2	90
	Máximo	839	5.034	10.068	5,7	97
G1 y G2	Promedio	754	4.526	9.051	4,5	95
	Desviación Estándar	79	477	953	0,5	2
	Mínimo	618	3.708	7.416	4,2	90
	Máximo	839	5.034	10.068	5,7	97

4.4 Resumen de Resultados Experimentales

En las Tablas 4.12 a 4.15 se muestran los principales resultados experimentales cualitativos y cuantitativos obtenidos en este capítulo. Los Experimentos 1 y 3 presentan sólo resultados cualitativos.

Tabla 4.12. Resumen de principales resultados cualitativos para pruebas de pilotaje de Minería Continua

Nº Exp.	Objetivo	Resultados
1	Verificar el funcionamiento del sistema completo e identificar errores para su corrección.	Material fino bajo 1/4" afecta el funcionamiento de componentes. Se suprime dicho material, mejorando el comportamiento del sistema.
2.1	Caracterizar el sistema de extracción Dozer – Panzer usando Granulometría G1 a través de medición de largos y productividades de descargas de Dozer. Estudiar la evolución de distribución de material en Panzer tras descarga de Dozer.	Presencia de colgaduras, rocas de gran tamaño que no son arrastradas por Panzer, descargas “naturales” y nulas y descarga de material en avance y retroceso de ciclo Dozer.
2.2	Caracterizar el sistema de extracción Dozer – Panzer usando Granulometría G2.	Ídem Experimento 2.1.
3	Caracterización de interacciones e interrupciones operacionales de sistema de extracción Dozer - Panzer usando Granulometría G1. Se evalúa si es que es posible descargar sobre el Panzer en tramos que ya contienen material.	Es posible efectuar descargas Dozer sobre material disponible en el Panzer. Para lo anterior se debe tener en consideración las consecuencias de efectuar dichas descargas.
4	Experimento de Sistema de Minería Continua (SMC) sin descuelgue de zanjas . Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro Dozer operativos simultáneos. Estudio de parámetros de productividad y utilización del Panzer.	Reducción de la productividad y utilización diaria al operar con una granulometría más gruesa. Cumplimiento de metas productivas (para caso de Granulometría G1) previstas en la revisión bibliográfica respecto de prueba industrial a realizar en División Andina.
5	Experimento de Sistema de Minería Continua (SMC) con descuelgue de zanjas . Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro Dozer operativos simultáneos. Estudio de parámetros de productividad y utilización del Panzer.	Al intervenir el sistema mediante el descuelgue de los puntos de extracción, el efecto de una granulometría más gruesa se ve inhibido, disminuyendo la diferencia entre las productividades y utilizaciones operando con G1 y G2.
6	Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. No se efectúa descuelgue de zanjas durante operación del sistema. Se utilizan como máximo 5, 6, 7 y 8 Dozer operativos simultáneamente.	Tendencia al incremento tanto de la productividad como de la utilización, para cuando se procede a utilizar un número mayor de Dozer operativos. La mayor productividad corresponde al caso en que se emplean el total de los Dozer de la calle de producción (8). Metas productivas se alcanzan en la mayoría de los casos, para ambas granulometrías.
7	Ídem Experimento 6. Se efectúa descuelgue inmediato de zanjas durante operación del sistema.	Ídem Experimentos 5 y 6.

Tabla 4.13. Resultados cuantitativos de Experimentos de caracterización del Sistema de Minería Continua

Experimento	Granulometría	Largo Descarga [m]	Productividad Dozer [t/ciclo]
2.1	G1 (d ₅₀ =0,80 m)	9,59 (± 4,88)	9,54 (± 9,30)
2.2	G2 (d ₅₀ =0,97 m)	8,29 (± 4,09)	9,99 (± 7,77)

Tabla 4.14. Resultados cuantitativos de productividades diarias y velocidades de extracción de Experimentos con operación de Sistema de Minería Continua. G: Granulometría

		Experimento							
		4		5		6		7	
G	Configuración	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]
G1	Tipo I	6.762	3,8	8.532	4,8	-	-	-	-
	Tipo II	7.098	4,0	9.096	5,1	-	-	-	-
	Tipo III	7.170	4,1	8.262	4,7	-	-	-	-
G2	Tipo III	3.948	2,2	8.820	5,0	-	-	-	-
G1	5 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	7.488	4,2	8.148	4,6
	6 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	7.272	4,1	9.900	5,6
	7 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	6.864	3,9	10.032	5,7
	8 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	7.968	4,5	8.676	4,9
G2	5 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	3.600	2,0	7.416	4,2
	6 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	6.204	3,5	9.168	5,2
	7 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	6.000	3,4	9.000	5,1
	8 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	6.612	3,7	10.068	5,7

Tabla 4.15. Resultados cuantitativos de utilizaciones diarias de Experimentos con operación de Sistema de Minería Continua. G: Granulometría

		Experimento			
		4	5	6	7
G	Configuración	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]
G1	Tipo I	83,5	94	-	-
	Tipo II	86,5	94	-	-
	Tipo III	84	93,5	-	-
G2	Tipo III	63	92	-	-
G1	5 Dozer Simultáneos	-	-	91	95
	6 Dozer Simultáneos	-	-	89	96
	7 Dozer Simultáneos	-	-	87	96
	8 Dozer Simultáneos	-	-	90	94
G2	5 Dozer Simultáneos	-	-	67	90
	6 Dozer Simultáneos	-	-	83	96
	7 Dozer Simultáneos	-	-	82	93
	8 Dozer Simultáneos	-	-	85	97

En las Figuras 4.21 y 4.22 se presentan gráficos representando las tendencias de las productividades y utilizaciones alcanzadas en los Experimentos 4 a 7, respectivamente.

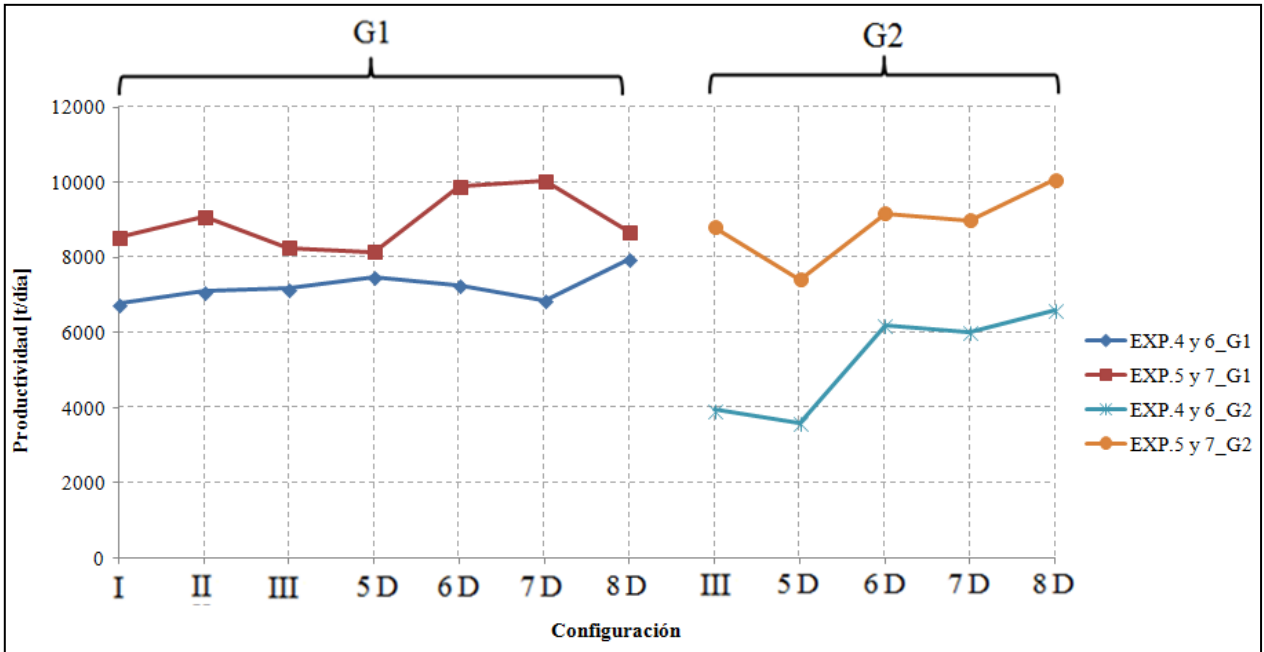


Figura 4.21. Resultados de productividades diarias de pruebas de pilotaje para Experimentos 4 a 7 de sistema de Minería Continua. D: Dozer

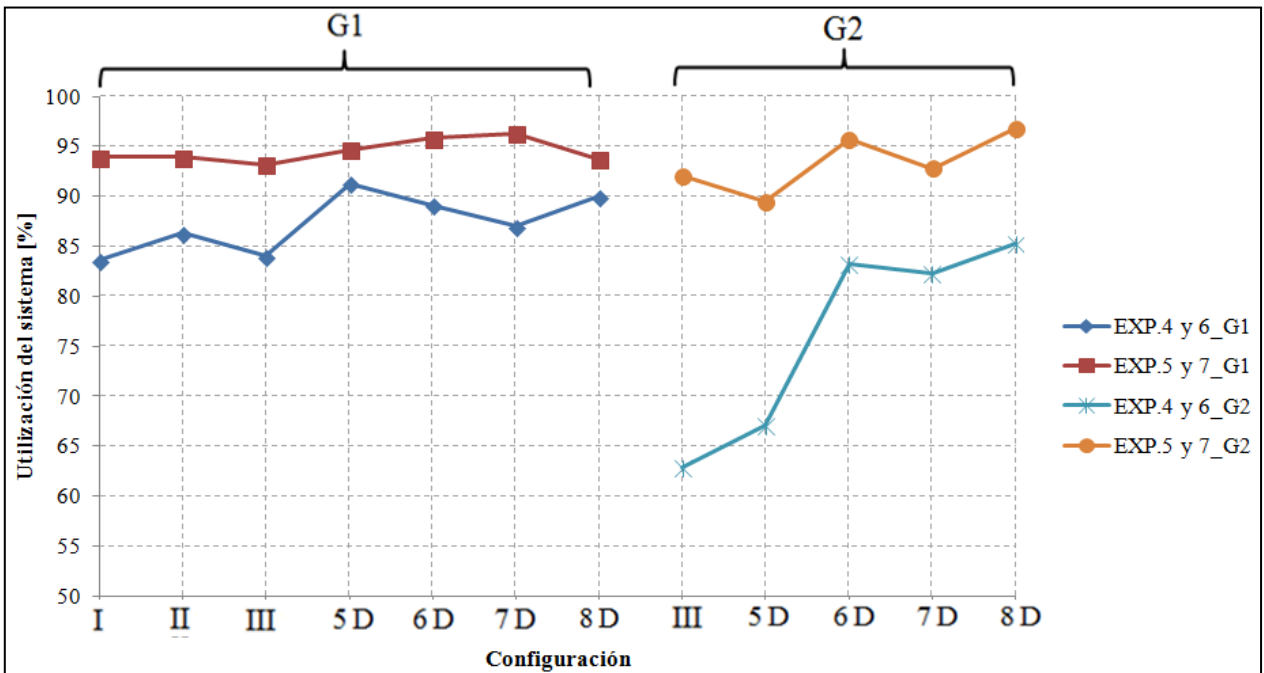


Figura 4.22. Resultados de utilizaciones diarias de pruebas de pilotaje para Experimentos 4 a 7 de sistema de Minería Continua. D: Dozer

4.5 Conclusiones

Las principales conclusiones emanadas de este capítulo son:

1. Se concluye que, a partir de las caracterizaciones del sistema de extracción Dozer-Panzer (tanto para G1 como G2), existe una gran variabilidad del sistema en cuanto a su productividad y posibles acoples entre descargas, siendo esto último representado por la aleatoriedad de los largos de las descargas.
2. En cuanto a si es posible que un Dozer descargue sobre una descarga previa en el Panzer, se aprecia que sí lo es, pero con consecuencias que pueden resultar críticas considerando que el material podría llegar a alcanzar grandes alturas en la galería Panzer. Luego, la conveniencia de ejecutar tales descargas depende del estado del Panzer y del umbral crítico en cuanto a altura de material que se desee evitar. Así, pueden llevarse a cabo descargas desplazadas, es decir, no directamente enfrentadas a una descarga previa, sino que solapándose sobre los extremos de esta última.
3. Al operar el sistema de Minería Continua con un máximo de cuatro Dozer operativos simultáneos y sin aplicación de descuelgue de zanjas, un incremento en un 22% del tamaño medio de las partículas se traduce en una reducción general de la productividad y utilización del sistema. Al incluir la estrategia de descuelgue inmediato, se concluye que el efecto de una granulometría más gruesa se ve inhibido.
4. En términos globales, para las condiciones de extracción a corto plazo presentadas en este trabajo, es decir, dos turnos diarios de seis horas cada uno de operación, se prevé el cumplimiento de los objetivos productivos del módulo de Minería Continua de 3 t/día/m². La única excepción observada corresponde al caso de operar con una granulometría más gruesa (G2) y con máximo cuatro Dozer simultáneos. Luego, se sentan los fundamentos de la planificación de extracción a corto plazo del sistema bajo estudio.
5. De los resultados expuestos se concluye una tendencia al incremento tanto de la productividad como de la utilización, para cuando se procede a utilizar un número mayor de Dozer operativos. Asimismo, se aprecia que la mayor productividad corresponde al caso en que se emplean el total de los Dozer de la calle de producción, es decir, 8 Dozer. Adicionalmente, se tiene que al incorporar al menos 6 Dozer simultáneos en la operación, se cumplen las metas productivas para el caso de una granulometría más gruesa (G2).

CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE PILOTAJE DE LA MINERÍA CONTINUA AUTÓNOMA

5.1 Introducción

En este capítulo se busca originar las bases para la potencial automatización del sistema de Minería Continua. Se llevan a cabo pruebas de pilotaje implementando un sistema de sensado y un sistema de control, los cuales permitirían monitorear el estado de saturación del Panzer y asignar de manera inteligente las descargas de los Dozer, respectivamente.

5.2 Plan Experimental

El plan experimental consta de las mismas variables y parámetros expuestos en el Capítulo 4, a excepción del desfase temporal de Dozer. Este último es considerado una variable ya que el sistema de control buscará asignar las descargas de los Dozer de manera libre con tal de saturar el Panzer. La Tabla 5.1 muestra el plan experimental detallado.

Tabla 5.1. Plan Experimental detallado de trabajo de investigación desarrollado para pruebas de pilotaje de Minería Continua Autónoma

N° Exp.	Objetivos y procedimiento
1	<ul style="list-style-type: none"> a. Experimento de Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA) sin descuelgue de zanjas. Utilización de granulometría G1 y G2 y un máximo de cuatro (4) Dozer operativos simultáneos. b. Incorporación de un sistema de automatización compuesto por un sistema de sensado y un sistema de control. Desfases de descargas de Dozer son variables. c. Estudio de sistema usando las tres configuraciones de operación principales identificadas en Experimento 4 de pruebas de pilotaje de sistema de Minería Continua (Capítulo 4). d. Se estudian parámetros de productividad y utilización del Panzer. e. Medición de producción del sistema al final del Panzer cada 5 min.
2	<ul style="list-style-type: none"> a. Experimento de Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA) con descuelgue de zanjas. Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro (4) Dozer operativos simultáneos. b. Ídem puntos b, c, d y e de Experimento 1. En este caso, se incorpora el descuelgue inmediato de zanjas que presenten estado de colgadura durante la operación.
3	<ul style="list-style-type: none"> a. Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. No se efectúa descuelgue de zanjas durante operación del sistema. b. Se utilizan como máximo 5, 6, 7 y 8 Dozer operativos simultáneamente. c. Se escogen Dozer operativos a partir de la configuración más productiva de Experimento 4 del Capítulo 4. d. Ídem puntos b, d y e de Experimento 1.
4	<ul style="list-style-type: none"> a. Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. Se efectúa descuelgue inmediato de zanjas que presenten estado de colgadura durante operación del sistema. b. Ídem puntos b, c y d de Experimento 3.

5.3 Resultados Experimentales

5.3.1 Experimento 1

En este experimento se procede a utilizar el sistema de automatización de la Minería Continua en la calle de producción Panzer representada a escala de laboratorio, es decir, el conjunto de sistemas: actuación, sensado y control. Como fue mencionado en el plan experimental del presente capítulo, en este caso los desfases temporales de activación de los Dozer son variables, adaptándose al estado de saturación del Panzer. De manera anexa, se considera que las zanjas no serán descolgadas durante la operación del sistema.

El objetivo de estas pruebas es estudiar el comportamiento del sistema autónomo y verificar su impacto en la productividad y utilización del Panzer.

El procedimiento seguido en estas pruebas es idéntico al de las pruebas de pilotaje de la Minería Continua (Capítulo 4), salvo que en este caso la instrumentación difiere. Al igual que en el Capítulo 4, se generan tres réplicas por turno de configuración principal bajo Granulometría G1 y sólo una prueba para el caso de la Granulometría G2. La Tabla 5.2 muestra los resultados.

Tabla 5.2. Resultados de productividades y utilizaciones de Sistema de Minería Continua Autónoma bajo modalidad de operación sin descuelgue de zanjas. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Config.	Turno	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]	Utilización Global [%]	
G1	Tipo I	A	893	5.358	10.686	6,0	99	98	
		B	888	5.328			97		
	Tipo II	A	887	5.322	10.962	6,2	96	97	
		B	940	5.640			98		
	Tipo III	A	917	5.502	10.062	5,7	98	95	
		B	760	4.560			97		
	Promedio			881	5.285	10.570	6,0	98	96,7
	Desviación Estándar			63	376	461	0,3	1	2
	Mínimo			760	4.560	10.062	5,7	96	95
	Máximo			940	5.640	10.962	6,2	99	98
G2	Tipo III	A	786	4.716	9.324	5,3	97	96	
		B	768	4.608			95		
	Promedio			777	4.662	-	-	96	-
	Desviación Estándar			13	76	-	-	1	-
	Mínimo			768	4.608	-	-	95	-
	Máximo			786	4.716	-	-	97	-
G1 y G2	Promedio		855	5.129	10.259	5,8	97	97	
	Desviación Estándar		72	430	728	0,4	1	1	
	Mínimo		760	4.560	9.324	5,3	95	95	
	Máximo		940	5.640	10.962	6,2	99	98	

En base a los resultados expuestos en la Tabla 5.2, se concluye que respecto a la configuración Tipo III, un aumento en el tamaño medio de las partículas (operación bajo escenario de Granulometría G2) induce una disminución de la productividad diaria en un 7%, mientras que la utilización diaria pasa de un 95% a un 96%.

En lo que concierne a la velocidad de extracción, la automatización de la Minería Continua permite alcanzar valores sobre 5 t/día/m² en ambos escenarios de granulometría, llegando incluso a estar sobre 6 t/día/m². Lo anterior permite concluir que una implementación tecnológica de este tipo facilitaría que el sistema de extracción de Minería Continua satisfaga las metas productivas impuestas por CODELCO.

Un resultado adicional estudiado en el sistema con automatización corresponde al comportamiento de la extracción a lo largo de la calle Panzer, lo cual es evaluado mediante las señales de activación de Dozer entregadas por el sistema de control. Como es previsto en el caso del sistema de Minería Continua sin automatización (Capítulo 4), al tratarse de secuenciamientos con desfases temporales fijos en el tiempo, cada uno de los Dozer terminará por ser activado una misma cantidad de veces finalizado el turno. Dicha magnitud se obtiene mediante la razón entre el tiempo total de operación (15 min a escala de laboratorio) y el tiempo de ciclo global de cada configuración. La Tabla 5.3 muestra resultados de señales de activación promedio para el sistema autónomo una vez terminada las pruebas (estado estacionario y Granulometría G1). Se evidencia que el Dozer más cercano al Sizer (Dozer 8) descarga un 8% menos de veces que el Dozer más alejado del Sizer (Dozer 1). Luego, se deduce que para los Dozer más cercanos al Sizer existe una tendencia a que descarguen una cantidad inferior de veces. Esto se debe a que, al estar en el tramo final del Panzer, contarán con menores probabilidades de encontrar lugar para descargar ya que los Dozer más alejados habrán saturado el Panzer aguas arriba en la calle de producción. Como consecuencia de este comportamiento, se podría estar divergiendo con respecto a cartas de tiraje previstas al inicio del turno, concluyendo que la planificación de extracción a corto plazo de la Minería Continua Autónoma debiera contemplar estrategias de extracción que mitiguen dicho fenómeno.

Tabla 5.3. Señales de activación de Dozer para Experimento 1 y Granulometría G1 en función de la posición de los Dozer. Sin descuelgue de zanjas

Número de Dozer	Distancia desde el Sizer [cm]	Número de señales de activación promedio para pruebas
1	144	49
5	129	48
2	110	49
6	95	49
3	76	49
7	60	47
4	41	48
8	26	45

Se tiene que, operando con Granulometría G1, la automatización del sistema de Minería Continua significa un incremento de aproximadamente un 98% en las veces que son activados los Dozer

respecto del caso sin automatización, es decir, los Dozer realizan su ciclo individual casi el doble de veces (Tabla 5.4). Esto refleja los incrementos productivos del sistema de Minería Continua Autónoma en relación al caso sin automatización.

Tabla 5.4. Señales de activación de Dozer para Experimento 1 y Granulometría G1 en función de la configuración de operación seleccionada

Configuración	Señales de activación de Dozer [#]						Promedio [#]
	Tipo I		Tipo II		Tipo III		
Turno	A	B	A	B	A	B	
Sistema de Minería Continua Autónoma	48	48	48	47	49	48	48
Sistema de Minería Continua	24	25	24	25	23	25	24
Incremento porcentual de señales de activación en Minería Continua Autónoma respecto a Minería Continua [%]	100	92	100	88	113	92	98

5.3.2 Experimento 2

Al igual que en el Capítulo 4, en este experimento se estudia la productividad del sistema Dozer – Panzer incorporando una estrategia de descuelgue de zanjas (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Resultados de productividades y utilizaciones de Sistema de Minería Continua Autónoma bajo modalidad de operación con descuelgue de zanjas. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Config.	Turno	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]	Utilización Global [%]	
G1	Tipo I	A	1.062	6.372	14.310	8,1	99	99,5	
		B	1.323	7.938			100		
	Tipo II	A	1.028	6.168	12.888	7,3	99	99,5	
		B	1.120	6.720			100		
	Tipo III	A	1.199	7.194	13.686	7,7	99	98	
		B	1.082	6.492			97		
	Promedio			1.136	6.814	13.628	7,7	99	99
	Desviación Estándar			109	653	713	0,4	1	1
	Mínimo			1.028	6.168	12.888	7,3	97	98
	Máximo			1.323	7.938	14.310	8,1	100	100
G2	Tipo III	A	892	5.352	12.714	7,2	99	99,5	
		B	1.227	7.362			100		
	Promedio			1.060	6.357	-	-	100	-
	Desviación Estándar			237	1.421	-	-	1	-
	Mínimo			892	5.352	-	-	99	-
	Máximo			1.227	7.362	-	-	100	-
G1 y G2	Promedio			1.117	6.700	13.400	7,6	99	99
	Desviación Estándar			133	799	740	0,4	1	1
	Mínimo			892	5.352	12.714	7,2	97	98
	Máximo			1.323	7.938	14.310	8,1	100	100

Luego, para la configuración Tipo III hay una reducción de un 7% en la productividad diaria al pasar de G1 a G2, mientras que la utilización se ve modificada desde un 98% a un 99,5%.

Las velocidades de extracción en este caso superan las 7 t/día/m² en ambas granulometrías, por lo que la estrategia de descuelgue de zanjas incrementa en promedio un 31% los valores mínimos de velocidades a concretar, respecto del Experimento 1.

La Tabla 5.6 se muestra el comportamiento de las señales de activación de los Dozer en función de su ubicación. En este caso se comprueba que el Dozer 8 descarga un 13% menos de veces que el Dozer 1, concluyendo la preferencia de asignación de Dozer planteada en el Experimento 1.

Tabla 5.6. Señales de activación de Dozer para Experimento 2 y Granulometría G1 en función de la posición de los Dozer. Caso con descuelgue de zanjas

Número de Dozer	Distancia desde el Sizer [cm]	Número de señales de activación promedio para pruebas
1	144	47
5	129	47
2	110	49
6	95	47
3	76	48
7	60	46
4	41	45
8	26	41

La Tabla 5.7 muestra, para la Granulometría G1, las señales de activación de Dozer por configuración y las compara con el caso sin automatización. Al igual que en el caso sin descuelgue de zanjas, el sistema autónomo activa los Dozer un número de veces cercano al doble del caso sin autonomía. Una posible explicación a esta tendencia es que el sistema con desfases fijos no detecta si las descargas asumidas en comienzo son llevadas a cabo de manera efectiva, por lo que, en caso de haber una carencia, el sistema no lo compensa y sigue operando de manera normal. Para el caso con automatización, el sistema detecta de manera constante el estado del Panzer, por lo que al existir ausencia de material no espera a cumplir el ciclo global del sistema para ejecutar las nuevas descargas de los Dozer, sino que las adelanta para satisfacer las solicitudes de llenado del transportador Panzer, optimizando su productividad y utilización.

Tabla 5.7. Señales de activación de Dozer para Experimento 2 y Granulometría G1 en función de la configuración de operación seleccionada

Configuración	Señales de activación de Dozer [#]						Promedio [#]
	Tipo I		Tipo II		Tipo III		
Turno	A	B	A	B	A	B	
Sistema de Minería Continua Autónoma	49	48	46	45	46	43	46
Sistema de Minería Continua	24	25	24	25	23	25	24
Incremento porcentual de señales de activación en Minería Continua Autónoma respecto a Minería Continua [%]	104	92	92	80	100	72	90

5.3.3 Experimento 3

En este experimento se evalúa la sensibilidad de la productividad y utilización del sistema de Minería Continua Autónoma al incrementar el número de Dozer operativos simultáneos por turno. Otro alcance importante de esta experiencia es la omisión del descuelgue de las zanjas.

La Tabla 5.8 muestra los resultados obtenidos. Se comprueba la misma tendencia creciente (aunque más leve) de la productividad identificada en el Capítulo 4 – Experimentos 6 y 7, en cuanto al aumento del número de Dozer operativos. Resulta relevante notar que las utilidades diarias, tanto aquí como en el Experimento 1, superan el 95% en ambas granulometrías, concluyendo el impacto de la automatización en esta variable.

Las velocidades de extracción superan las 5 t/día/m², comprobando el cumplimiento de las metas productivas revisadas en el Capítulo 2.

Tabla 5.8. Resultados de productividades y utilidades de Experimento 3 en Sistema de Minería Continua Autónoma bajo modalidad de operación sin descuelgue. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Número Dozer Operativos	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]	
G1	5	803	4.818	9.636	5,5	96	
	6	989	5.934	11.868	6,7	99	
	7	1.045	6.270	12.540	7,1	99	
	8	1.067	6.402	12.804	7,2	99	
	Promedio	976	5.856	11.712	6,6	98	
	Desviación Estándar	120	719	1.439	0,8	2	
	Mínimo	803	4.818	9.636	5,5	96	
	Máximo	1.067	6.402	12.804	7,2	99	
	G2	5	866	5.196	10.392	5,9	98
		6	870	5.220	10.440	5,9	98
7		843	5.058	10.116	5,7	97	
8		917	5.502	11.004	6,2	96	
Promedio		874	5.244	10.488	5,9	97	
Desviación Estándar		31	186	372	0,2	1	
Mínimo		843	5.058	10.116	5,7	96	
Máximo		917	5.502	11.004	6,2	98	
G1 y G2		Promedio	925	5.550	11.100	6,3	98
		Desviación Estándar	98	586	1.173	0,7	1
	Mínimo	803	4.818	9.636	5,5	96	
	Máximo	1.067	6.402	12.804	7,2	99	

De la Tabla 5.9 se observa que en este caso, al operar el sistema autónomo con más de cuatro Dozer simultáneos, en promedio se activan un 127% más que en el caso sin automatización.

Tabla 5.9. Señales de activación de Dozer para Experimento 3 y Granulometría G1 en función de la configuración de operación seleccionada

	Señales de activación de Dozer [#]				Promedio [#]
	5	6	7	8	
Número de Dozer Operativos	5	6	7	8	
Sistema de Minería Continua Autónoma	41	37	32	28	34
Sistema de Minería Continua	19	16	14	12	15
Incremento porcentual de señales de activación en Minería Continua Autónoma respecto a Minería Continua [%]	116	131	129	133	127

5.3.4 Experimento 4

Experimento idéntico a las pruebas del Experimento 3, pero involucrando el descuelgue de las zanjas de manera inmediata. La Tabla 5.10 ilustra los resultados. Las velocidades de extracción superan las 7 t/día/m² en ambas granulometrías, sobrepasando en la mayoría de los casos las 8 t/día/m². En el caso de la Granulometría G1 se llega a triplicar la meta productiva de 3 t/día/m² (desde 6 Dozer). La utilización en este escenario es prácticamente completa (100%).

Tabla 5.10. Resultados de productividades y utilizaciones de Experimento 4 en Sistema de Minería Continua Autónoma bajo modalidad de operación con descuelgue. G: Granulometría. “G1 y G2” muestra estadísticas para datos de ambas granulometrías

G	Número Dozer Operativos	Prod. [t/h]	Prod. [t/turno]	Prod. [t/día]	Velocidad Extracción [t/día/m ²]	Utilización [%]
G1	5	1.294	7.764	15.528	8,8	99
	6	1.431	8.586	17.172	9,7	100
	7	1.402	8.412	16.824	9,5	100
	8	1.494	8.964	17.928	10,1	100
	Promedio	1.405	8.432	16.863	9,5	100
	Desviación Estándar	84	501	1.002	0,6	1
	Mínimo	1.294	7.764	15.528	8,8	99
	Máximo	1.494	8.964	17.928	10,1	100
G2	5	1.205	7.230	14.460	8,2	100
	6	1.165	6.990	13.980	7,9	99
	7	1.061	6.366	12.732	7,2	100
	8	1.196	7.176	14.352	8,1	100
	Promedio	1.157	6.941	13.881	7,9	100
	Desviación Estándar	66	397	793	0,4	1
	Mínimo	1.061	6.366	12.732	7,2	99
	Máximo	1.205	7.230	14.460	8,2	100
G1 y G2	Promedio	1.281	7.686	15.372	8,7	100
	Desviación Estándar	150	900	1.800	1,0	0
	Mínimo	1.061	6.366	12.732	7,2	99
	Máximo	1.494	8.964	17.928	10,1	100

Luego, se concluye que en el caso ideal de una estrategia de descuelgue inmediata se alcanzarían valores de utilización de 100% para un número de Dozer operativos mayor a cuatro. No obstante, se tiene que las productividades sobrepasan en gran medida valores de 3 t/día/m², por lo que el hecho que exista una utilización completa significa que el material en el Panzer estaría aumentando en la altura de la calle de producción. Como se vio en el Capítulo 4-Experimento 3, existen consecuencias en cuanto a este comportamiento del material, por lo que se debiera analizar si dicha productividad justifica los riesgos asociados al material en exceso en el Panzer.

La Tabla 5.11 permite apreciar que en este caso, al operar el sistema autónomo con más de cuatro Dozer simultáneos, en promedio se activan un 130% más que en el caso sin automatización.

Tabla 5.11. Señales de activación de Dozer para Experimento 4 y Granulometría G1 en función de la configuración de operación seleccionada

Número de Dozer Operativos	Señales de activación de Dozer [#]				Promedio [#]
	5	6	7	8	
Sistema de Minería Continua Autónoma	43	37	32	28	34
Sistema de Minería Continua	19	16	14	12	15
Incremento porcentual de señales de activación en Minería Continua Autónoma respecto a Minería Continua [%]	126	131	129	133	130

5.4 Resumen de Resultados Experimentales

Las Tablas 5.12 a 5.14 muestran los principales resultados experimentales cualitativos y cuantitativos de este capítulo.

Tabla 5.12. Resumen de principales resultados cualitativos para pruebas de pilotaje de Minería Continua Autónoma

Nº Exp.	Objetivo	Resultados
1	Experimento de Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA) sin descuelgue de zanjas . Utilización de Granulometrías G1 y G2 y un máximo de cuatro Dozer operativos simultáneos. Estudio del comportamiento del sistema autónomo y verificación de su impacto en la productividad y utilización del Panzer.	Se alcanzan velocidades de producción sobre 5 t/día/m ² en ambas granulometrías. Implementación de automatización facilitaría que el sistema de extracción de Minería Continua satisfaga las metas productivas impuestas por CODELCO. Dozer más cercanos al Sizer descargan una cantidad inferior de veces. Dozer realizan su ciclo individual casi el doble de veces que el caso sin automatización.
2	Ídem Experimento 1, pero con descuelgue de zanjas .	Ídem Experimento 1. Se alcanzan velocidades de producción sobre 7 t/día/m ² en ambas granulometrías.
3	Estudio de sensibilidad de productividad y utilización del Panzer usando Granulometrías G1 y G2. No se efectúa descuelgue de zanjas . Se utilizan como máximo 5, 6, 7 y 8 Dozer operativos simultáneamente.	Ídem Experimento 1. Dozer realizan su ciclo individual un 127% más de veces que el caso sin automatización.
4	Ídem Experimento 6. Se efectúa descuelgue inmediato de zanjas .	Ídem Experimento 2. En promedio, se alcanzan utilizaciones de 100%.

Tabla 5.13. Resultados cuantitativos de productividades diarias y velocidades de extracción de Experimentos con operación de Sistema de Minería Continua Autónoma. G: Granulometría

		Experimento							
		1		2		3		4	
G	Configuración	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]	Prod. [t/día]	Veloc. Ext. [t/día/m ²]
G1	Tipo I	10.686	6,0	14.310	8,1	-	-	-	-
	Tipo II	10.962	6,2	12.888	7,3	-	-	-	-
	Tipo III	10.062	5,7	13.686	7,7	-	-	-	-
G2	Tipo III	9.324	5,3	12.714	7,2	-	-	-	-
G1	5 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	9.636	5,5	15.528	8,8
	6 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	11.868	6,7	17.172	9,7
	7 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	12.540	7,1	16.824	9,5
	8 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	12.804	7,2	17.928	10,1
G2	5 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	10.392	5,9	14.460	8,2
	6 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	10.440	5,9	13.980	7,9
	7 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	10.116	5,7	12.732	7,2
	8 Dozer Simultáneos	-	-	-	-	11.004	6,2	14.352	8,1

Tabla 5.14. Resultados cuantitativos de utilizaciones diarias de Experimentos con operación de Sistema de Minería Continua Autónoma. G: Granulometría

		Experimento			
		1	2	3	4
G	Configuración	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]	Utilización Global [%]
G1	Tipo I	98	94	-	-
	Tipo II	97	94	-	-
	Tipo III	95	93,5	-	-
G2	Tipo III	96	92	-	-
G1	5 Dozer Simultáneos	-	-	96	99
	6 Dozer Simultáneos	-	-	99	100
	7 Dozer Simultáneos	-	-	99	100
	8 Dozer Simultáneos	-	-	99	100
G2	5 Dozer Simultáneos	-	-	98	100
	6 Dozer Simultáneos	-	-	98	99
	7 Dozer Simultáneos	-	-	97	100
	8 Dozer Simultáneos	-	-	96	100

Las Figuras 5.1 y 5.2 presentan las tendencias de las productividades y utilizaciones alcanzadas en los Experimentos 1 a 4, respectivamente.

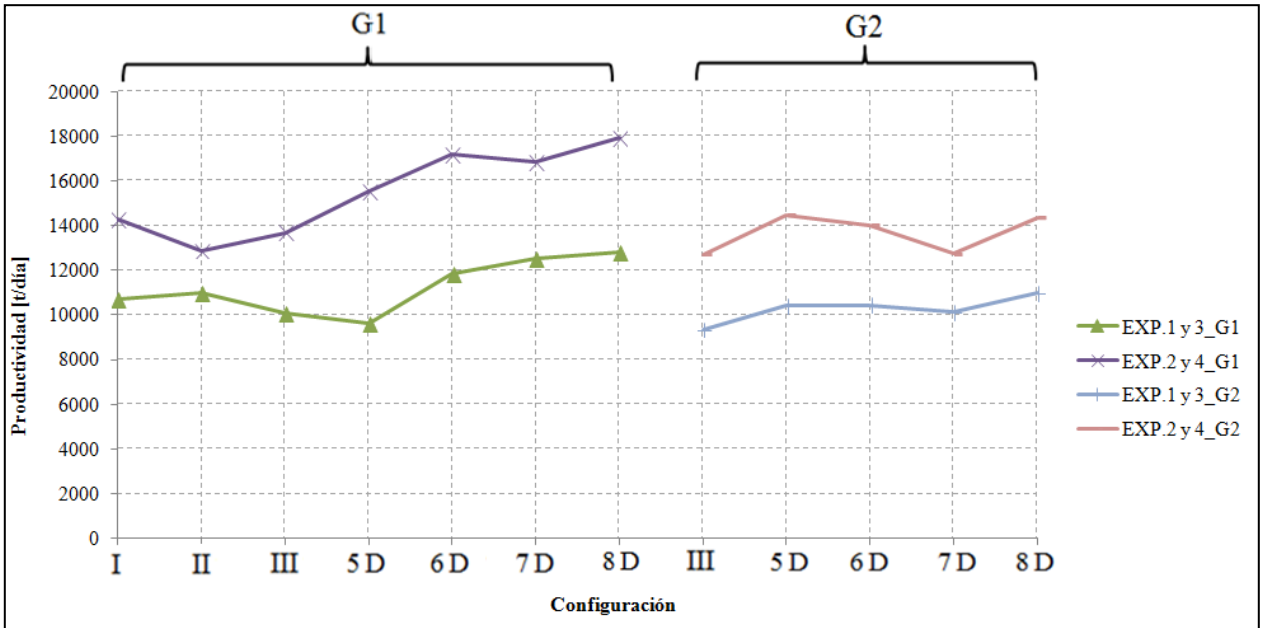


Figura 5.1. Resultados de productividades diarias de pruebas de pilotaje para Experimentos 1 a 4 de sistema de Minería Continua Autónoma. D: Dozer

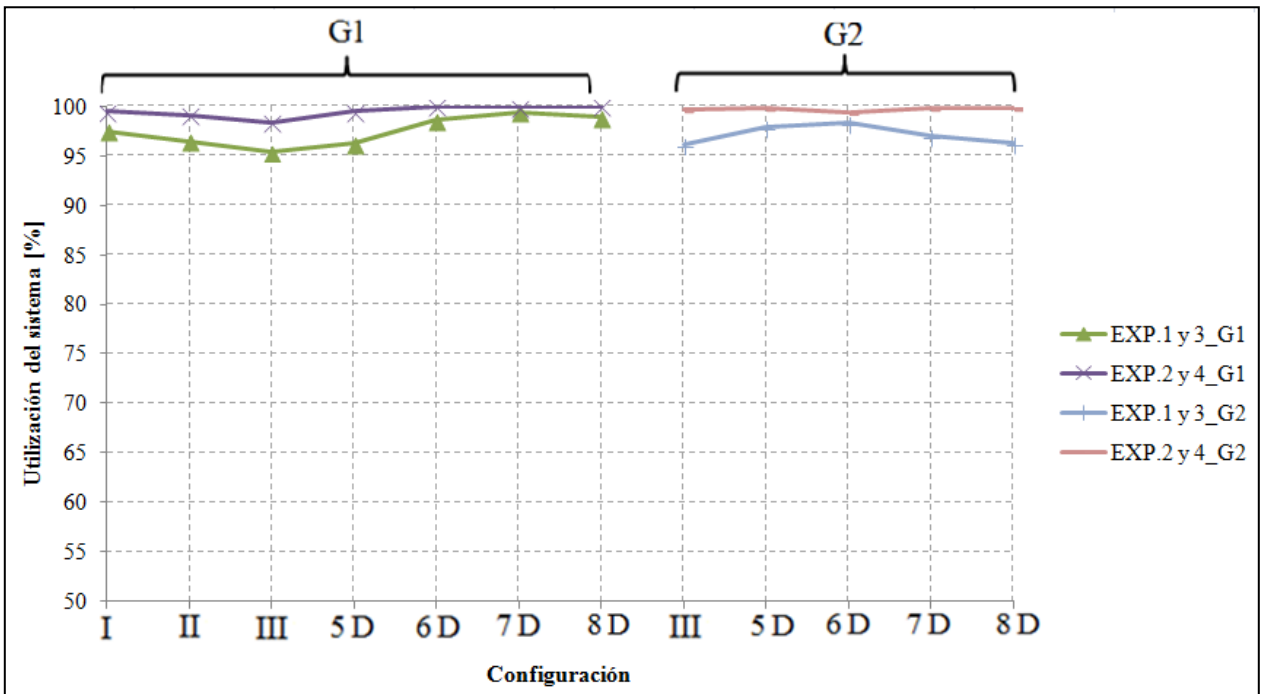


Figura 5.2. Resultados de utilizaciones diarias de pruebas de pilotaje para Experimentos 1 a 4 de sistema de Minería Continua Autónoma. D: Dozer

5.5 Conclusiones

A continuación se explicitan las conclusiones elaboradas en base a los resultados de este capítulo:

1. En base a los resultados obtenidos sobre productividades, se tiene que la implementación de un sistema automatización permite alcanzar velocidades de extracción por sobre 5 t/día/m^2 , para ambas granulometrías estudiadas. Luego, la incorporación de esta tecnología facilitaría que el sistema de Minería Continua alcance las metas productivas plasmadas por CODELCO, esto es, velocidades de extracción en régimen sobre 3 t/día/m^2 .
2. En los que respecta a las señales de activación de Dozer a lo largo de la calle de producción, se comprueba que aquellos más cercanos al Sizer descargan una cantidad menor de veces. Esto se debe a que, al estar en el tramo final del Panzer, contarán con menores probabilidades de encontrar lugar para descargar ya que los Dozer más alejados habrán saturado el Panzer aguas arriba en la calle de producción. Como consecuencia de este comportamiento, se podría estar divergiendo con respecto a cartas de tiraje previstas al inicio del turno, concluyendo que la planificación de extracción a corto plazo de la Minería Continua Autónoma debiera contemplar estrategias de extracción que mitiguen dicho fenómeno.
3. De los Experimentos 1 y 2, se tiene que el pasar de una Granulometría G1 a una G2 no impacta más que en un 7% de pérdidas productivas y no más de 2% de reducción de la utilización. De esta manera, el sistema autónomo disminuye la brecha entre los valores productivos asociados a diferentes granulometrías o condiciones de fragmentación.
4. El sistema autónomo activa los Dozer un número de veces cercano al doble del caso sin autonomía. Esto refleja los incrementos productivos del sistema de Minería Continua Autónoma en relación al caso sin automatización. Una posible explicación a esta tendencia es que el sistema con desfases fijos no detecta si las descargas asumidas en comienzo son llevadas a cabo de manera efectiva, por lo que, en caso de haber una carencia, el sistema no lo compensa y sigue operando de manera normal. Para el caso con automatización, el sistema detecta de manera constante el estado del Panzer, por lo que al existir ausencia de material no espera a cumplir el ciclo global del sistema para ejecutar las nuevas descargas de los Dozer, sino que las adelanta para satisfacer las solicitudes de llenado del transportador Panzer, optimizando su productividad y utilización.
5. Se comprueba la misma tendencia creciente (aunque más leve) de la productividad identificada en el Capítulo 4 – Experimentos 6 y 7, en cuanto al aumento del número de Dozer operativos. Resulta relevante notar que las utilizations diarias superan el 95% en ambas granulometrías, llegando incluso a un 100%, concluyendo el impacto positivo de la automatización en esta variable.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Introducción

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5.

En primer lugar se hace una comparación con los resultados de los trabajos previos asociados al modelamiento físico de la Minería Continua, así como de los datos de la operación de la prueba industrial en la División Salvador de CODELCO.

Posteriormente, se discute el comportamiento operacional del sistema de Minería Continua y su variante automatizada. Adicionalmente, se llevan a cabo los análisis de productividad y utilización respectivos, generando también un análisis de los impactos que generan las variaciones efectuadas al sistema en cuanto al incremento en el número de Dozer operacionales simultáneos por turno, como también en la modificación de la fragmentación.

Finalmente, se cierra el capítulo entregando una serie de críticas al sistema de Minería Continua, además de las recomendaciones pertinentes.

6.2 Comparación con Modelos Anteriores

La Tabla 6.1 muestra una comparación entre los resultados productivos de las modelaciones físicas de la Minería Continua anteriores (Alvarez, 2010; Orellana, 2012), los de la prueba industrial llevada a cabo en Salvador (2007-2008) y los de este trabajo. Notar que para cada una de las productividades el valor no se encuentra escalado por el factor de escala para la densidad, es decir, $k_p = 1$. Destacar que, pese a ser el d_{80} de la Granulometría G2 del trabajo de tesis menor al tamaño respectivo de la Granulometría G1, en general, para los demás tamaños de partículas la Granulometría G2 presenta una tendencia más gruesa que la G1.

Tabla 6.1. Comparación de productividades medias de pruebas realizadas para Sistema de Minería Continua

Prueba/Modelo	d_{80} [m]	Productividad promedio [t/ciclo]
Prueba Industrial División Salvador	1,25	7,90 (\pm 4,70)
Modelo 2D-Exp. 3 (Alvarez, 2010)	1,25	4,60 (\pm 5,50)
Modelo 3D-Exp. 2 (Orellana, 2012)	1,50	4,80 (\pm 4,10)
Modelo 3D calle Panzer G1	1,29	9,54 (\pm 9,29)
Modelo 3D calle Panzer G2	1,27	9,99 (\pm 7,77)

De la Tabla 6.1 se deduce que las productividades promedio de los Dozer alcanzadas en las experiencias del Capítulo 4 relacionadas con la caracterización del sistema Dozer – Panzer, difieren en magnitud respecto de la productividad alcanzada por la Prueba en División Salvador. En ese sentido, se observa una subestimación y sobreestimación de la productividad del Dozer

para los modelos 2D y 3D (Alvarez, 2010; Orellana, 2012) y el modelo 3D de la calle de la calle Panzer de este trabajo, respectivamente. Lo anterior podría responder a la representatividad del material con el cual se han desarrollado las pruebas de pilotaje.

Cabe destacar que el valor promedio de la Prueba Industrial no contiene ciclos nulos o sin productividad (no fueron medidos en la experiencia) (Orellana, 2012). Por esta razón no es posible realizar un test estadístico que permita hacer una comparación con los datos de caracterización de este trabajo. Conjuntamente, el diseño del Modelo 3D de la calle Panzer no representa exactamente las condiciones de la operación en Salvador. Por el contrario, se ajusta a las condiciones de la prueba a realizar en División Andina.

Luego, a partir de los datos disponibles, se estudia la existencia de diferencia estadística significativa entre las poblaciones de datos para Granulometría G1 y Granulometría G2. Se efectúa un test de Student para testear la significancia de la diferencia entre las medias experimentales y el test de Fisher para comparar las varianzas experimentales.

Como resultado de los test realizados y para una significancia del 95%, se obtiene que a nivel de las medias productivas de equipos Dozer, no existe una diferencia significativa en el caso de incrementar el tamaño medio de partículas en un 22% (paso de Granulometría G1 a G2). En cuanto a las variancias, se comprueba que sí existe una diferencia significativa. El detalle de los test puede ser apreciado en el Anexo H.

De forma complementaria, el comportamiento observado en la Tabla 6.1 puede estar asociado a los siguientes factores:

1. Los modelos 2D y 3D previos involucran un único punto de extracción: al existir sólo un punto de extracción bajo estudio, es probable que las restricciones de borde sean más estrictas en cuanto a que el material granular está contenido en una estructura de diferente naturaleza (acrílico). Luego, al incluir más puntos aledaños y las geometrías de ápex en el modelo 3D con calle de producción Panzer, se estaría favoreciendo la interacción del material granular de un punto de extracción con sectores bajo sus mismas características.
2. La diferencia en el tamaño de partículas: claramente, la granulometría juega un rol fundamental en lo que se refiere a la productividad. De la Tabla 6.1 se infiere que, con excepción del modelo 2D, a menores tamaños de partículas existe una mayor productividad debido al favorecimiento de las condiciones de flujo de material a nivel del punto de extracción y su batea respectiva. Tal como se hizo notar anteriormente, esta tendencia no es del todo cierta, ya que la mayor productividad observada corresponde al caso del modelo 3D con Granulometría G2, la cual corresponde a un caso de material más grueso tomando en cuenta el total de la distribución de tamaño de partículas.

6.3 Análisis del Comportamiento Operacional

A lo largo de las experiencias realizadas se han reflejado variados comportamientos e interacciones del sistema bajo estudio. A continuación se profundiza en cada una de ellas:

1. *Funcionamiento de Dozer*

- a. Existen problemas con el desplazamiento del equipo bajo la presencia de material granular fino. A escala real esto no debiera ser inconveniente dadas las magnitudes de las fuerzas de los sistemas de actuación respecto a la resistencia del material.
- b. Se detecta que el equipo puede extraer material en las dos etapas de su ciclo: avance y retroceso.
- c. Adicionalmente, se tienen los eventos denominados como “descargas naturales”, en los cuales se desencadena un flujo de material desde la galería Dozer estando éste fuera de su ciclo propio de activación. Tales fenómenos se asocian a inestabilidades de la pila de material bajo el Dozer.

2. *Funcionamiento de Panzer*

- a. Ocurren detenciones del transportador Panzer como consecuencia de la acumulación de material fino bajo la correa de arrastre. Se corrige el problema vía la supresión del material conflictivo (bajo 1/4"). Se espera que a nivel mina no sucedan tales acontecimientos debido a la magnitud de las fuerzas de actuación a esa escala.
- b. También se verifican detenciones del transportador debido a rocas de gran tamaño que quedan incrustadas entre una galería Dozer y la pared que la enfrenta. El Panzer sufre estas paralizaciones ya que consiste en un material distinto al de escala real, por lo que se pronostica su carencia en la prueba industrial en Andina.

3. *Funcionamiento de Sistema de Minería Continua (SMC)*

- a. Con el avanzar de cada prueba se evidencia la presencia de colgaduras a nivel de los puntos de extracción. Tal interferencia operacional reduce las tasas de extracción por ciclo de los Dozer afectados, lo que deriva en una reducción de la productividad y utilización del sistema.
- b. Se aprecian fragmentos cuyo tamaño y forma les permite permanecer estables sobre las placas diagonales a los costados del Panzer, permaneciendo sin movimiento. En consecuencia, este material debe ser empujado por descargas provenientes aguas arriba en el Panzer. En un caso desfavorable, lo anterior podría tener como resultado el atascamiento de grandes cantidades de material, saturando ciertos tramos del Panzer y afectando negativamente el funcionamiento del sistema.
- c. Los fragmentos de material cuyas dimensiones superan los 5 cm (2,5 m a escala real) son propensos a generar atascamientos y saturaciones de material sobre el Panzer. Además, para el caso de las pruebas con Granulometría G2 se tienen fragmentos que al solaparse sobre descargas previas llegan a alcanzar alturas críticas para las pruebas (7,5 cm de altura en el Panzer).

- d. En el secuenciamiento fijo se tiene la presencia de tramos vacíos del Panzer que son irremediables, ya que no se alteran en ningún momento los desfases temporales entre los Dozer. De esta manera, lo anterior corresponde a una desventaja respecto del caso automatizado donde los desfases son variables.

4. *Funcionamiento de Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA)*

- a. Se aprecian los mismos tres puntos iniciales del Sistema de Minería Continua.
- b. Se observa un mayor solapamiento de las descargas Dozer como resultado de la implementación del sistema de automatización.
- c. En cuanto a lo último, se debe manejar umbrales críticos de altura de material sobre el Panzer. El propósito de ellos es que los sensores antes de un Dozer permitan detectar el estado actual de la altura del material y comprobar si es conveniente que se lleve a cabo la descarga. En caso que no se realice la extracción del Dozer, se debe asumir cierta reducción de la utilización en volumen del Panzer, con tal de favorecer la operación del sistema.

6.4 Análisis del Comportamiento Productivo

Resulta relevante para el presente trabajo poder analizar la tendencia de las variables catalogadas como de mayor interés: productividad y utilización de calle Panzer de sistema de Minería Continua. En la Figura 6.1 se muestra un gráfico de dispersión donde se contrastan ambas variables para el total de valores medios de las réplicas realizadas para las granulometrías G1 y G2. En este caso se ha planteado representar la utilización del Panzer en función de la productividad del mismo, a través de un modelo de regresión lineal. La función preliminar es:

$$U_p[\%] = a * P_p + b \tag{Ecuación 6.1}$$

donde U_p es la utilización del sistema Panzer en unidades de porcentaje y P_p su productividad en unidades de toneladas/hora.

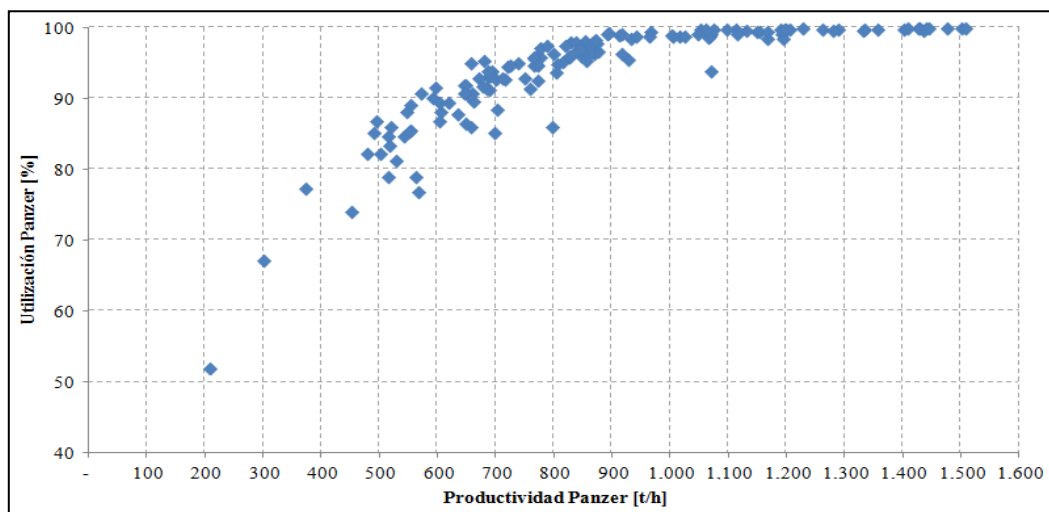


Figura 6.1. Visualización de utilizaciones de Panzer en función de la productividad para ambas granulometrías

El modelo ajustado se basa en los datos de las pruebas de pilotaje considerando todas las réplicas.

$$U_p[\%] = 0,0202 * P_p + 76,4313 \quad \text{Ecuación 6.2}$$

La Tabla 6.2 muestra las estadísticas de la regresión efectuada. Se aprecia que existe una dispersión considerable de los datos, lo que se complementa con la Figura 6.2, que muestra el contraste entre las utilizaciones medidas y las estimadas mediante el modelo de regresión.

Tabla 6.2. Estadísticas de modelo de regresión

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,779
Coefficiente de determinación R ²	0,607
R ² ajustado	0,605
Error típico	4,511
Observaciones	144

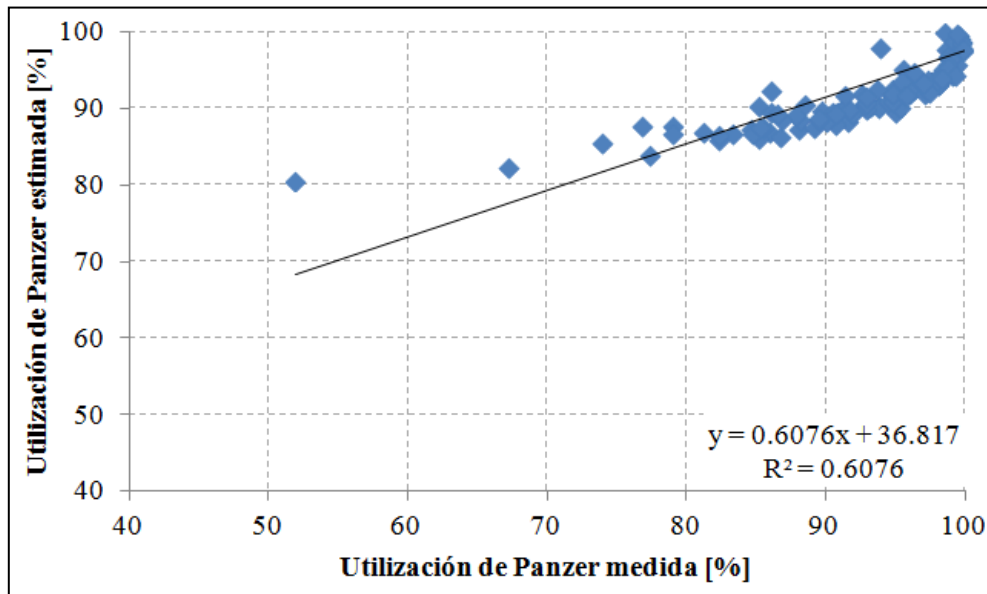


Figura 6.2. Relación entre utilización media y estimada por modelo de regresión

Del modelo, se deduce que para una productividad del Panzer mayor o igual a 1.168 t/h, la utilización alcanza un valor de 100%.

Cabe destacar que el modelo no contempla utilizaciones bajo 76%, es decir, carece de robustez considerando que para un estado de productividad nula, es directo que existirá utilización nula también. Luego, se considera que el modelo por sí solo no compone una buena herramienta de estimación de la utilización, teniendo que ser refinado quizás con otros tipos de modelos (como no lineales, por ejemplo).

A continuación se presenta el análisis por separado de las variables principales de este estudio.

6.4.1 Productividad y Velocidad de Extracción

Se procede a analizar los resultados de los Capítulos 4 y 5 en función de las productividades y velocidades de extracción alcanzadas por ambos sistemas: Sistema de Minería Continua y Sistema de Minería Continua Autónoma. Se debe destacar que los Experimentos 4, 5 6 y 7 del Capítulo 4 son equivalentes estructuralmente a los Experimentos 1, 2, 3 y 4 del Capítulo 5, en donde la diferencia radica en la implementación del sistema de automatización en el último. Asimismo, los pares de Experimentos 4-5 y 6-7 en el Capítulo 4 y 1-2 y 3-4 en el Capítulo 5, representan el contraste que se desea evaluar por cuanto los experimentos que conforman el primer término del par son ejecutados sin descuelgue de zanjas mientras que el segundo término incluye la aplicación de tal estrategia.

En la Tabla 6.3 es posible apreciar los incrementos porcentuales que evidencian las productividades diarias y velocidades de extracción al aplicar una estrategia de descuelgue de zanjas, respecto del caso base sin dicha implementación. Se deduce que el escenario ideal planteado en las pruebas alternativas con intervención de las zanjas corresponde a un caso difícil de concretar operacionalmente, pero que, para el caso de operar con un máximo de 4 Dozer simultáneos y con una Granulometría G1, permitiría manejar niveles de producción diaria un 23% y 29% mayor en promedio, para el sistema sin automatización y con automatización, respectivamente. De manera global, se identifica un incremento promedio de la productividad por sobre el 20%. Es más, para el total de configuraciones disponibles se tienen incrementos promedio de 24% y 76% para el sistema de Minería Continua operando con Granulometría G1 y G2, respectivamente; así como incrementos promedio de 38% y 33% para el sistema de Minería Continua Autónoma operando con Granulometría G1 y G2, respectivamente.

Tabla 6.3. Incrementos porcentuales de las productividades diarias y velocidades de extracción de los sistemas de Minería Continua y Minería Continua Autónoma al aplicar estrategia de descuelgue inmediato de zanjas, respecto del caso base sin intervención. G1 y G2 indican las granulometrías empleadas

Experimentos comparados	Configuración	Sistema de Minería Continua		Sistema de Minería Continua Autónoma	
		G1	G2	G1	G2
En Sistema de Minería Continua: 4 y 5 En Sistema de Minería Continua Autónoma: 1 y 2	Tipo I	+26%	-	+34%	-
	Tipo II	+28%	-	+18%	-
	Tipo III	+15%	+123%	+36%	+36%
	Promedio	+23%	+123%	+29%	+36%
En Sistema de Minería Continua: 6 y 7 En Sistema de Minería Continua Autónoma: 3 y 4	5 Dozer Simultáneos	+9%	+106%	+61%	+39%
	6 Dozer Simultáneos	+36%	+48%	+45%	+34%
	7 Dozer Simultáneos	+46%	+50%	+34%	+26%
	8 Dozer Simultáneos	+9%	+52%	+40%	+30%
	Promedio	+25%	+64%	+45%	+32%
Estadísticas para total de configuraciones	Promedio	+24%	+76%	+38%	+33%
	Desviación Estándar	+14%	+36%	+13%	+5%
	Mínimo	+9%	+48%	+18%	+26%
	Máximo	+46%	+123%	+61%	+39%

Un segundo aspecto relevante a analizar corresponde al impacto que tiene la automatización del sistema de Minería Continua. Para ello, se comparan los resultados de las pruebas de pilotaje, presentando en la Tabla 6.4 los incrementos porcentuales que se generan en la productividad y velocidad de extracción respecto del caso base sin automatización. Para este caso, el criterio de comparación se basa en contrastar los resultados de los Experimentos 4, 5, 6 y 7 del caso sin automatización, con sus semejantes del escenario con automatización, es decir, con los Experimentos 1, 2, 3 y 4 de este último caso, respectivamente. Esto último ya que se confrontan agrupados en relación a la configuración y la presencia o no de descuelgue, recordando que los Experimentos 4 y 6 del caso sin automatización y 1 y 3 del caso autónomo no aplican descuelgue de zanjas y los Experimentos 5 y 7 del primer caso y 2 y 4 del segundo, sí lo hacen.

Tabla 6.4. Incrementos porcentuales de las productividades diarias y velocidades de extracción como consecuencia de pasar de un Sistema de Minería Continua (SMC) a un Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA)

Configuración	Experimentos Comparados			
	4 (SMC) y 1 (SMCA) Sin descuelgue		5 (SMC) y 2 (SMCA) Con descuelgue	
	G1	G2	G1	G2
Tipo I	+58%	-	+68%	-
Tipo II	+54%	-	+42%	-
Tipo III	+40%	+136%	+66%	+44%
Promedio	+51%	+136%	+58%	+44%
Configuración	Experimentos Comparados			
	6 (SMC) y 3 (SMCA) Sin descuelgue		7 (SMC) y 4 (SMCA) Con descuelgue	
	G1	G2	G1	G2
5 Dozer Simultáneos	+29%	+189%	+91%	+95%
6 Dozer Simultáneos	+63%	+68%	+73%	+52%
7 Dozer Simultáneos	+83%	+69%	+68%	+41%
8 Dozer Simultáneos	+61%	+66%	+107%	+43%
Promedio	+59%	+98%	+85%	+58%
Estadísticas para el total de configuraciones				
Promedio	+55%	+106%	+73%	+55%
Desviación Estándar	+17%	+55%	+21%	+23%
Mínimo	+29%	+66%	+42%	+41%
Máximo	+83%	+189%	+107%	+95%

De la Tabla 6.4 se puede afirmar que, en general y para el total de configuraciones, la incorporación de un sistema de automatización impacta positivamente sobre el sistema de Minería Continua, evidenciando un incremento promedio de las productividades y velocidades de extracción por sobre un 50%. Es así, como para los experimentos de ambos escenarios (sin y con automatización) sin contemplar una estrategia de descuelgue, existen aumentos de un 55% y 106%, para la Granulometría G1 y G2, respectivamente. Por otro lado, al aplicar el descuelgue de las zanjas, se obtienen valores de un 73% y 55%, para la Granulometría G1 y G2, respectivamente.

Notar que los datos más reales en cuanto al comportamiento que se espera enfrentar en la prueba industrial de la Minería Continua en División Andina, son aquellos asociados a la operación sin descuelgue inmediato de zanjas. Luego, bajo esa premisa, la incorporación de un sistema de sensado y control incrementa, en promedio, un 55% de la productividad diaria esperada para el sistema de Minería Continua, siendo esto último sometido a la obtención de la Granulometría G1.

Dirigiendo el análisis a lo expuesto en cuanto a la Granulometría G2, se deduce el gran efecto de la automatización debido a que generaría productividades por sobre el doble de la conseguida con el sistema sin autonomía. De esta forma, se concluye que la implementación de dicha tecnología permitiría aplacar las dificultades que una granulometría de ese tipo podría desencadenar en cuanto a lo que productividad se refiere. Cabe destacar que, dado que sólo se efectúa una prueba por configuración bajo esta granulometría, puede tratarse de resultados anómalos, por lo que se recomienda la realización de una mayor cantidad de réplicas.

Asociado a las velocidades de extracción alcanzadas en las pruebas de pilotaje de los Capítulos 4 y 5, se corrobora que, de concretarse la Granulometría G1, la meta productiva de 3 t/día/m² estaría siendo superada por el Sistema de Minería Continua.

En el caso desfavorable que la prueba industrial en División Andina se enfrente a una granulometría más gruesa, como la G2, se verifica que al implementar al menos 6 Dozer activos simultáneos para el sistema de Minería Continua, se lograrían cubrir velocidades de extracción sobre 3 t/día/m² (caso de pruebas de pilotaje sin descuelgue de zanjas). Por otro lado, resulta importante destacar que para el Sistema de Minería Continua Autónoma se supera el valor anterior en todo escenario.

6.4.2 Utilización del Panzer

Al igual que en el caso anterior referente a productividad y velocidad de extracción, se procede a analizar el comportamiento de la utilización del Panzer de acuerdo a las pruebas de pilotaje realizadas. Se siguen los mismos procedimientos en cuanto a pares de experimentos a comparar.

La Tabla 6.5 muestra los incrementos de utilización, medidos como la diferencia entre las resultantes de operar con automatización y sin automatización. Se observa que el Sistema de Minería Continua Autónoma reduce la brecha entre las utilidades para los casos sin y con descuelgue de zanjas, llegando a diferencias mínimas para promedio del total de configuraciones (en torno a 1%). Es más, se observan diferencias negativas, lo cual significaría que al realizar el descuelgue inmediato de aquellos puntos de extracción colgados, se obtiene una menor utilización respecto del caso en donde no se interviene el sistema. El caso que más impacta en cuanto a implementar una estrategia de descuelgue corresponde al desarrollado con el Sistema de Minería Continua y bajo una Granulometría G2, en donde se alcanza una diferencia promedio entre las utilidades diarias del Panzer de un 18%.

Tabla 6.5. Incrementos porcentuales de las utilizaciones diarias del Panzer de los sistemas de Minería Continua y Minería Continua Autónoma al aplicar estrategia de descuelgue inmediato de zanjas, respecto del caso base sin intervención. G1 y G2 indican las granulometrías empleadas

Experimentos comparados	Configuración	Sistema de Minería Continua		Sistema de Minería Continua Autónoma	
		G1	G2	G1	G2
En Sistema de Minería Continua: 4 y 5 En Sistema de Minería Continua Autónoma: 1 y 2	Tipo I	+11%	-	-4%	-
	Tipo II	+8%	-	-3%	-
	Tipo III	+10%	+29%	-2%	-4%
	Promedio	+9%	+29%	-3%	-4%
En Sistema de Minería Continua: 6 y 7 En Sistema de Minería Continua Autónoma: 3 y 4	5 Dozer Simultáneos	+4%	+23%	+3%	+2%
	6 Dozer Simultáneos	+7%	+13%	+1%	+1%
	7 Dozer Simultáneos	+9%	+11%	+1%	+3%
	8 Dozer Simultáneos	+4%	+12%	+1%	+4%
	Promedio	+6%	+15%	+2%	+3%
Estadísticas para total de configuraciones	Promedio	+7%	+18%	-0,4%	+1%
	Desviación Estándar	+3%	+8%	+3%	+3%
	Mínimo	+4%	+11%	-4%	-4%
	Máximo	+11%	+29%	+3%	+4%

Analizando las consecuencias de la implementación de un sistema de automatización, la Tabla 6.6 permite concluir que a nivel general, es posible incrementar la utilización al menos en un 3%. Este valor se obtiene en el caso de incorporar además el descuelgue de las zanjas y estar operando con una Granulometría G1. Aquí se observa que para las pruebas con un máximo de 4 Dozer operativos simultáneos (comparación de Experimentos 5 y 2) es plausible que el sistema autónomo no afecte a la utilización del Panzer, resultando incrementos nulos. Por otro lado, al analizar el escenario sin descuelgue, es decir, el caso más representativo y abordable en la operación minera, se identifica que para el total de configuraciones existe una mejora en la utilización diaria en aproximadamente un 10% y 21% para la Granulometría G1 y G2, respectivamente. En base a esto último, se concluye la relevancia del sistema de automatización por cuanto permitiría, bajo la suposición de enfrentar un escenario de granulometría gruesa (G2), alcanzar utilizaciones diarias cuyas diferencias con respecto al caso sin automatización equivalen a más de dos veces las diferencias presenciadas al estar bajo un escenario de Granulometría G1 (21% versus un 10%). Luego, de darse este último caso planteado, sería recomendable la adición de algún tipo de sistema de automatización con tal de mitigar los efectos negativos que dicha granulometría más gruesa pudiera significar sobre la utilización del Panzer.

Tabla 6.6. Incrementos porcentuales de las utilizaciones diarias del Panzer como consecuencia de pasar de un Sistema de Minería Continua (SMC) a un Sistema de Minería Continua Autónoma (SMCA)

Configuración	Experimentos Comparados			
	4 (SMC) y 1 (SMCA)		5 (SMC) y 2 (SMCA)	
	Sin descuelgue		Con descuelgue	
	G1	G2	G1	G2
Tipo I	+14,5%	-	0%	-
Tipo II	+10,5%	-	0%	-
Tipo III	+11%	+33%	0%	0%
Promedio	+12%	+33%	0%	0%

Configuración	Experimentos Comparados			
	6 (SMC) y 3 (SMCA)		7 (SMC) y 4 (SMCA)	
	Sin descuelgue		Con descuelgue	
	G1	G2	G1	G2
5 Dozer Simultáneos	+5%	+31%	+4%	+10%
6 Dozer Simultáneos	+10%	+15%	+4%	+3%
7 Dozer Simultáneos	+12%	+15%	+4%	+7%
8 Dozer Simultáneos	+9%	+11%	+6%	+3%
Promedio	+9%	+18%	+5%	+6%

Estadísticas para el total de configuraciones				
Promedio	+10%	+21%	+3%	+5%
Desviación Estándar	+3%	+10%	+3%	+4%
Mínimo	+5%	+11%	0%	0%
Máximo	+15%	+33%	+6%	+10%

6.5 Análisis de Automatización de Sistema de Minería Continua

En la experiencia sin automatización se tiene que por cada ciclo de operación los Dozer descargan una única vez, por lo que a nivel global, la extracción es uniforme en la columna de material. Lo anterior tiene una excepción, la cual sucede al existir colgadas. Bajo tales eventos, a pesar de generarse la orden de activación del Dozer no hay material a la salida del punto de extracción, por lo que como resultado se obtiene una extracción no uniforme.

Para el caso autónomo, se tiene que los tiempos de activación de los Dozer son variables ya que se ajustan a la disponibilidad de espacio en el Panzer, a la altura del material del material en el mismo, así como la ubicación de los Dozer y lo lejos que estén de sus tasas de extracción esperadas. En base a esto, puede resultar que para un rango de tiempo determinado no exista una extracción uniforme de los Dozer, sino que más bien podrían existir situaciones en las cuales el contexto de comportamiento del material en el Panzer obligue a algunos a ser activados con mayor frecuencia que otros.

Se hace necesario diferenciar entre la uniformidad de la extracción medida como las señales de activación de los Dozer y aquella medida como la descarga efectiva de material tras la ejecución de la señal de activación. Esto último es representado actualmente por índices de uniformidad (Susaeta, 2004). Para los alcances de este trabajo se restringe el estudio al primer caso, en donde

se registra el número de veces que cada Dozer operativo recibió la señal de descarga por parte del sistema de control (Capítulo 5).

Tal como se identificó en los resultados del Capítulo 5, existe una tendencia en reducir el número de activaciones para aquellos Dozer más cercanos a la descarga al final del Panzer (ubicación del Sizer). De esta manera, a pesar de tener configurada una capacidad de carga reservada (ver Anexo E), el Sistema de Minería Continua Autónoma presenta diferencias en cuanto a la cantidad de veces en que los Dozer a lo largo de la calle de producción son activados para descargar material.

Continuando con el análisis de la automatización de la Minería Continua, se presenta el siguiente posible mecanismo de detección del estado de los puntos de extracción:

1. Ubicación de dos sensores de perfil de llenado del Panzer por cada Dozer de la calle de producción, uno antes y otro después de la galería del Dozer a estudiar.
2. Considerar sensor anterior en posición $x_{i,0}$ y posición posterior en $x_{i,1}$; con i indicando el número de Dozer.
3. El sistema de sensado alimentará al sistema de control con las alturas: mínima, promedio y máxima, del perfil de llenado del Panzer en posiciones $x_{i,0}$ y $x_{i,1}$. Para hacer comparativas las mediciones y verificar los estados, se debe comparar la medición de $x_{i,0}$ con la de $x_{i,1}$ para un retardo temporal de esta última de:

$$t = \frac{|\Delta x|}{v_p} = \frac{|x_{i,1} - x_{i,0}|}{v_p} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

con v_p la velocidad del Panzer.

4. Sea la altura medida en el punto $x_{i,0} = h_{i,0}$ y la medida en $x_{i,1} = h_{i,1}$, entonces se tendrán los siguientes casos posibles (considerando el retardo temporal de comparación):
 - a. $\Delta h = h_{i,1} - h_{i,0} = 0$. No hay cambio en perfil de llenado del Panzer, luego, el Dozer no ha descargado material. También podría darse el caso que entre las distancias de medición se genere una descarga posterior a $x_{i,0}$ y se produzca un reacomodo del material tal que la altura sensada en $x_{i,1}$ sea idéntica a la de $x_{i,0}$, pudiendo interpretar equivocadamente una carencia de descarga.

En un proceso automatizado, la dificultad se presenta cuando no se es capaz de determinar una colgadura en forma autónoma. De esta manera, mediante este caso se podría indicar el estado de colgadura de un punto de extracción: se debe monitorear el tiempo transcurrido en que permanezca $\Delta h = 0$, para de esa forma determinar si punto se declara colgado y poder intervenirlo.

- b. $\Delta h = h_{i,1} - h_{i,0} > 0$. La altura a la salida del punto de extracción es mayor que la anterior al punto, lo que puede indicar claramente una descarga de material, cuyo volumen podría ser estimado en base a este diferencial de volumen. Por otro lado, podría darse el caso crítico de que simplemente exista un reacomodo de material que induzca nuevamente una interpretación errada de los datos (es decir, que no exista descarga real, sino simplemente redistribución del material sobre el Panzer en tramo Δx).

Este caso podría servir para estimar la cantidad de tonelaje extraído por punto de extracción: se podría verificar cumplimiento de estrategia de tiraje y de perfil de extracción para evitar problemas futuros (bombeos de barro, dilución temprana, etc.)

- c. $\Delta h = h_{i,1} - h_{i,0} < 0$. Posiblemente se deba a una redistribución del material sobre el Panzer, abarcando una mayor superficie del transportador y por lo tanto disminuyendo la altura.
5. Los sensores ubicados a lo largo de la galería de producción permiten además tener un registro del estado del material en cuanto a sobre-tamaños o colpas. Éstas lograrían identificarse mediante el láser al observar tramos muy regulares de material (sectores con líneas continuas) indicando una potencial colpa.
6. Para efectos de la alimentación al chancador Sizer, los sensores también pueden servir para detectar colpas que deriven en un mayor tiempo de residencia en el Sizer, pudiendo coordinar y predecir el tiempo de trabajo que le tomará al chancador procesar el material, lo cual podría ser controlado mediante una reducción de la velocidad del Panzer y de los ciclos de Dozer.
7. Igualmente, los sensores de volumen pueden ser complementados con sensores de velocidad de motores eléctricos, desplazamiento Panzer, Dozer, Sizer, etc. Por ejemplo, para el caso del Panzer, al existir una reducción no controlada de la velocidad, podría inferirse que va sobrecargado y que se debe reducir la alimentación de Dozer. Lo mismo para el Sizer, en donde puede deducirse una saturación mediante el monitoreo de sus mecanismos eléctricos. Para el caso de los Dozer, pueden usarse las presiones hidráulicas que se detecten en el sistema de actuación.

6.6 Evaluación Crítica de Sistema de Minería Continua

Uno de los conceptos que cumple un rol fundamental para el correcto desarrollo y validación de la tecnología de Minería Continua es la fragmentación. Tal como ha sido abordado en los capítulos anteriores (Capítulos 4 y 5), la fragmentación cumple un papel primordial en el buen desempeño del Sistema de Minería Continua. De considerarse el caso hipotético del no

cumplimiento de la granulometría esperada tras la aplicación del pre-acondicionamiento en División Andina, es posible llegar a enfrentar pérdidas productivas del orden de un 45% (caso configuración Tipo III) y de un 24% (caso con más de 4 Dozer operativos simultáneos), ambas bajo un escenario de Minería Continua sin descuelgue de zanjas. Luego, resulta trascendental el asegurar con el mayor grado de certeza posible la fragmentación secundaria a medir en los puntos de extracción.

Como efecto directo del no cumplimiento de la fragmentación esperada está el incremento en los eventos de colgaduras y sobre-tamaños. Para el primero de los casos, el funcionamiento de lanzas hidráulicas ubicadas sobre el dintel del Dozer se ve limitado para colgaduras generadas a alturas mayores. En consecuencia, se requiere de alternativas de descuelgue que permitan darle la mayor continuidad a la operación.

Dentro de los principales eventos críticos que se postulan para esta tecnología, de forma complementaria a la fragmentación, se tienen:

1. Atascamientos de rocas en el Panzer: la posibilidad de generar saturaciones de material en tramos del Panzer podría inducir alturas críticas de material sobre el Panzer, lo cual afectaría el normal funcionamiento del transportador, así como los desfases de Dozer y los procesos de reducción secundaria.
2. Condiciones de agua-barro: en la prueba a desarrollar en División Andina se supone un estado de agua-barro prácticamente nulo, lo cual corresponde una simplificación de cuidado. En caso de presentarse las condiciones de agua-barro, se desconoce los efectos en la operación y productividad del sistema bajo estudio. Se pronostican dificultades asociadas a la existencia de partes móviles en cada uno de los elementos de la Minería Continua.
3. Colapsos de un sector: la Minería Continua no permitiría mover tan fácilmente el equipo Panzer en caso de colapso de un sector. En efecto, de generarse un colapso imprevisto o inminente, lo más probable es que se pierda el transportador de cadenas. En este sentido, el sistema convencional es más versátil por cuanto un LHD puede trasladarse a otra calle y seguir produciendo. Por otro lado, el Panzer ocupa una sección de galería de ancho menor, por lo que no tendría problemas con ciertos grados de convergencia de la galería de producción (reducción de la sección de la galería debido a esfuerzos inducidos). En cuanto a los Dozer, estos pueden ser removidos e insertados en los puntos de extracción en cualquier momento para mantenimiento o descuelgue.
4. En base a todo lo expuesto, podría ser motivo de estudio el mejoramiento de los equipos de extracción actuales del sistema de Minería Continua (Dozer – Panzer) y de la construcción de las galerías (al ser malla triangular se deriva en complicaciones desde el punto de vista de las singularidades).

Para terminar esta evaluación, a juicio del autor y de las experiencias llevadas a cabo en este trabajo de tesis, se plantean las siguientes recomendaciones para la correcta implementación y funcionamiento del sistema de Minería Continua a escala industrial:

1. Mantenciones preventivas del conjunto de equipos involucrados en Minería Continua: dado que es un sistema en serie, es de vital importancia que cada eslabón de la cadena esté siempre operativo. Lo anterior está previsto en las ingenierías desarrolladas (JRI, 2010), pero de todas formas resulta trascendental reforzar dicho proceso.
2. Monitoreo/inspección de puntos de extracción: implementación de sistemas de sensado (ya sea del tipo láser/cámara o radar) para detección temprana de colgaduras y así contribuir a mejorar la planificación de extracción a corto plazo. Al poseer el estado de los puntos será posible diagnosticarlos y modificar la estrategia de extracción de ser necesario.
3. Descuelgue de puntos de extracción: dentro de opciones de descuelgue se podría evaluar la incorporación de drones tele comandados con cargas explosivas. Se plantea el uso de tecnologías manejadas a distancia, contribuyendo a la automatización de este tipo de operaciones.
4. Unidades de actuación: basado en los incrementos productivos identificados por el aumento del número de Dozer operativos simultáneos por turno, se recomienda tener posteriormente una unidad de actuación independiente por Dozer. Lo anterior requiere de un análisis de costos e inversiones, verificando si las productividades pronosticadas compensan dichas inversiones.
5. Automatización de la operación: los resultados de las pruebas de pilotaje indican que al incorporar un sistema de automatización (sensado más control) es posible alcanzar mayores niveles de productividad y utilización del Panzer. Lo anterior puede ser complementado con una estructuración de comunicación entre los subsistemas involucrados, así como de monitoreo de bombas y tensión de cadenas en Panzer.

La implementación de un sistema de automatización tendría por objetivo incorporar un sistema que permita determinar en línea la productividad de cada Dozer a lo largo de la calle de producción. Esto último, debido a que para efectos prácticos, a nivel industrial se requiere cumplir con una carta de tiraje específica de acuerdo a planificación, lo cual contempla cumplir con los planes propuestos y no generar mayores esfuerzos inducidos sobre pilares u otras estructuras en particular. De forma global, se busca conocer el origen del material que estaría llegando al chancador Sizer, para así retroalimentar e influir sobre el sistema de control con el fin cumplir con las tasas de extracción en cada uno de los puntos que conformen la calle de producción.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Mediante el presente trabajo de tesis se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el propósito de determinar el estado del arte en el conocimiento de la tecnología de Minería Continua. A través de modelos físicos y numéricos se ha obtenido valiosa información en cuanto al comportamiento, productividad y parámetros de diseño del sistema para un punto de extracción aislado, esto es, considerando un único equipo extractor Dozer. Luego, existe escaso y prácticamente nulo entendimiento de la interacción de los componentes Dozer y Panzer del sistema de Minería Continua. Basado en la revisión efectuada, se concluye lo siguiente:

- Para el cumplimiento de las metas productivas de la Minería Continua resulta importante la implementación de la mecanización y automatización, utilizando tecnología que permita materializar un sistema automático y remoto.
- Se establece como valor de producción objetivo de las pruebas de pilotaje el cumplimiento de una velocidad de extracción de 3 t/día/m^2 .
- La modelación física asociada a la Minería Continua se ha limitado al estudio de un Dozer aislado. Luego, se desconoce la interacción Dozer – Panzer y las consecuencias que dicho comportamiento tenga sobre la productividad y secuenciamiento del sistema, justificando de esta manera la realización de pruebas de pilotaje representativas de una calle de producción.

Con el objetivo de establecer, a partir de experimentación a escala reducida, los fundamentos de la planificación de extracción a corto plazo de la Minería Continua y sentar las bases para su potencial automatización, se diseñó y construyó un modelo físico representativo de una calle de producción del módulo de Minería Continua a implementar en División Andina. Junto al modelo, fue posible la elaboración de un sistema de automatización, así como también generar dos granulometrías, una con un tamaño medio de partículas un 22% mayor que la otra.

El modelo físico estudiado corresponde a una herramienta de gran utilidad por cuanto permite simular diferentes escenarios de operación del sistema de Minería Continua, además de colaborar con el mejor entendimiento de esta nueva tecnología. Asociado a su representatividad, de los resultados obtenidos es posible afirmar que las pruebas de pilotaje permiten hacer predicciones acertadas en torno a la interacción entre los elementos Dozer – Panzer y la productividad y utilización del sistema a escala real. Esto último se debe a que el movimiento del material granular está determinado principalmente por la acción de la gravedad como fuerza preponderante tanto en el modelo como en el prototipo (escala mina).

Asociado a las caracterizaciones de la interacción de los componentes Dozer – Panzer para las granulometrías estudiadas, se identifica una gran variabilidad del sistema en cuanto a su productividad y posibles acoples entre descargas, siendo esto último representado por la aleatoriedad de los largos de las descargas. Es así como, para la Granulometría G1 y G2 se obtienen productividades de 9,54 (\pm 9,29) t/ciclo y de 9,99 (\pm 7,77) t/ciclo, respectivamente; adicionalmente, se obtienen largos de descarga de 9,59 (\pm 4,88) m y de 8,29 (\pm 4,09) m, respectivamente.

En general, es posible concretar descargas de los Dozer de manera tal que queden enfrentadas a alguna descarga ya ubicada en el Panzer. De efectuarse la situación anterior, podrían tenerse consecuencias negativas desde el punto de vista operacional, alcanzándose alturas de material que imposibiliten el correcto funcionamiento del Panzer, como también atascamientos que terminen por saturar con material ciertos tramos del mismo.

Al operar el sistema de Minería Continua con un máximo de cuatro Dozer simultáneos y sin aplicación de descuelgue de zanjás, un incremento en un 22% del tamaño medio de las partículas se traduce en una reducción general de la productividad y utilización del sistema. Al incluir la estrategia de descuelgue inmediato, se concluye que el efecto de una granulometría más gruesa se ve inhibido, obteniendo productividades similares para ambos escenarios de fragmentación.

En términos globales, para las condiciones de extracción a corto plazo presentadas en este trabajo, es decir, dos turnos diarios de seis horas cada uno de operación, se prevé el cumplimiento de los objetivos productivos del módulo de Minería Continua de 3 t/día/m².

De los resultados obtenidos en las experiencias sin y con automatización, se concluye una tendencia al incremento tanto de la productividad como de la utilización, para cuando se procede a utilizar un número mayor de Dozer operativos. Asimismo, se aprecia que la mayor productividad corresponde al caso en que se emplean el total de los Dozer de la calle de producción, es decir, ocho Dozer. Adicionalmente, para el caso sin automatización, se tiene que al incorporar al menos 6 Dozer simultáneos en la operación se cumplen las metas productivas para el caso de una Granulometría más gruesa (G2). Por otro lado, resulta importante destacar que para el Sistema de Minería Continua Autónoma se supera el valor anterior en todo escenario.

En términos de los resultados obtenidos con la incorporación de un sistema de automatización al sistema de Minería Continua, se establece que, sujeto a las condiciones y limitantes de las pruebas de pilotaje realizadas, permite alcanzar mayores valores de productividad, velocidades de extracción y utilización del Panzer.

Finalmente, se concluye que el incorporar tecnologías de automatización permite disminuir la brecha entre los valores productivos asociados a diferentes granulometrías o condiciones de fragmentación. Asociado al mismo sistema autónomo, éste activa los Dozer un número de veces cercano al doble del caso sin autonomía. Esto refleja los incrementos productivos del sistema de Minería Continua Autónoma en relación al caso sin automatización.

7.2 Recomendaciones y Trabajo Futuro

Como recomendaciones y trabajo futuro se sugiere lo siguiente:

1. Realizar una mayor cantidad de réplicas de las pruebas de pilotaje. Junto a esto, se propone efectuar pruebas que consideren acortar los largos de descarga con el objetivo de solapar las descargas de los Dozer y con ello reducir el tiempo de ciclo del sistema e incrementar la utilización del Panzer.
2. Estudiar la implementación de un sistema de automatización a escala industrial. Lo anterior se basa en los resultados positivos desde el punto de vista productivo obtenidos con dicha incorporación en las pruebas de pilotaje realizadas.
3. Hacer pruebas de activación de Dozer sujeto a las secuencias de extracción planificadas para la prueba industrial de División Andina. Es preciso destacar que las configuraciones estudiadas a lo largo del presente trabajo podrían no ser aplicables a lo que el módulo de Minería Continua en División Andina pretende aplicar en relación a su plan de producción y secuencia de extracción. Por consiguiente, la tesis presentada sirve como herramienta para comprender el sistema y estudiar su potencial productivo bajo ciertas condiciones, no representando tal vez las mismas que se usarán en la prueba industrial.
4. Gestar un nuevo sistema de control que incorpore la capacidad productiva del Sizer. Esto debido a que resultaría interesante adicionar como nueva restricción la capacidad de procesamiento del Sizer y verificar si aun así el sistema de automatización presenta los incrementos productivos alcanzados en este trabajo.
5. Validar los resultados de este trabajo de investigación con aquellos datos reales que emanen de la prueba industrial a desarrollar en División Andina.
6. En relación a los fenómenos no cubiertos por el presente trabajo se recomienda:
 - a. Estudiar la frecuencia de colgaduras asociadas a esta tecnología empleando un modelo a escala que permita la aplicación de confinamiento al material granular.
 - b. Estudiar los esfuerzos en el modelo a escala, requiriendo la incorporación de sensores de esfuerzos/carga. Objetivo es analizar el comportamiento de los esfuerzos inducidos en la galería Panzer para diferentes configuraciones de operación.
 - c. Estudiar el flujo gravitacional para la calle de producción Panzer representada mediante la implementación de trazadores inteligentes y layers/marcadores de roca. Los trazadores podrían contener tecnología INS (Sistema de Navegación por Inercia), la cual es una herramienta de navegación que utiliza un computador,

sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación (giroscopios) para calcular continuamente la posición, orientación y velocidad de un objeto en movimiento sin la necesidad de referencias externas.

- d. Estudiar el fenómeno de subsidencia en el modelo físico una vez que se extrae material para diferentes configuraciones de operación.
- e. Estudiar la dilución mediante materiales granulares diferenciables. Debido a que el modelo físico representa una línea de producción completa con ocho puntos de extracción, resulta interesante poder examinar el comportamiento de la migración de diluyentes para distintas secuencias/configuraciones de extracción. Lo anterior podría a su vez alimentar modelos numéricos posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, P. (2010). Modelamiento Físico de la Minería Continua. Memoria de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Barriga, J. (2012), Secuencia Accionamiento Dozer, Nota Técnica N° IA-004, IM2. Santiago, Chile.
- Carrasco, F., Encina, V., Geister, F., & Le Féaux, R. (2004). Continuous mining for caving methods. Proceedings of MassMin 2004 Conference (págs. 79-82). Santiago, Chile.
- Encina, V., Baez, F., Geister, F., & Steinberg, J. (2008). Mechanized continuous drawing system: A technical answer to increase production capacity for large block caving mines. Proceedings of MassMin 2008 Conference, (págs. 553-562). Lulea, Suecia.
- IM2. (2008). Proyecto IM2” TT04/2007: “Prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua”; “Asesoría técnica civil y electromecánica”, Informe Final; División Salvador; Preparado por GMP (Green Mining Process Ltda.)
- IM2. (2009). Proyecto IM2” TT04/2007: “Prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua”; “Informe de evaluación de instrumentación en MC”. División Salvador.
- JRI. (2010). Informe de la Ingeniería Conceptual y Básica de la Validación Industrial Tecnológica de la Minería Continua. Santiago, Chile.
- Lara, F. (2008). Diseño del Nivel de Producción para un Módulo Genérico de Minería Continua. Memoria de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Orellana, L. (2012). Estudio de variables de diseño del sistema de Minería Continua a partir de experimentación en laboratorio. Tesis de Magister, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Orellana, M. (2011). Modelación Numérica de la Minería Continua. Tesis de Magister, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (Part 2). Proceedings of MassMin 2004 Conference (págs. 173-178.). Santiago, Chile.

ANEXOS

Anexo A: Diseño de Minería Continua

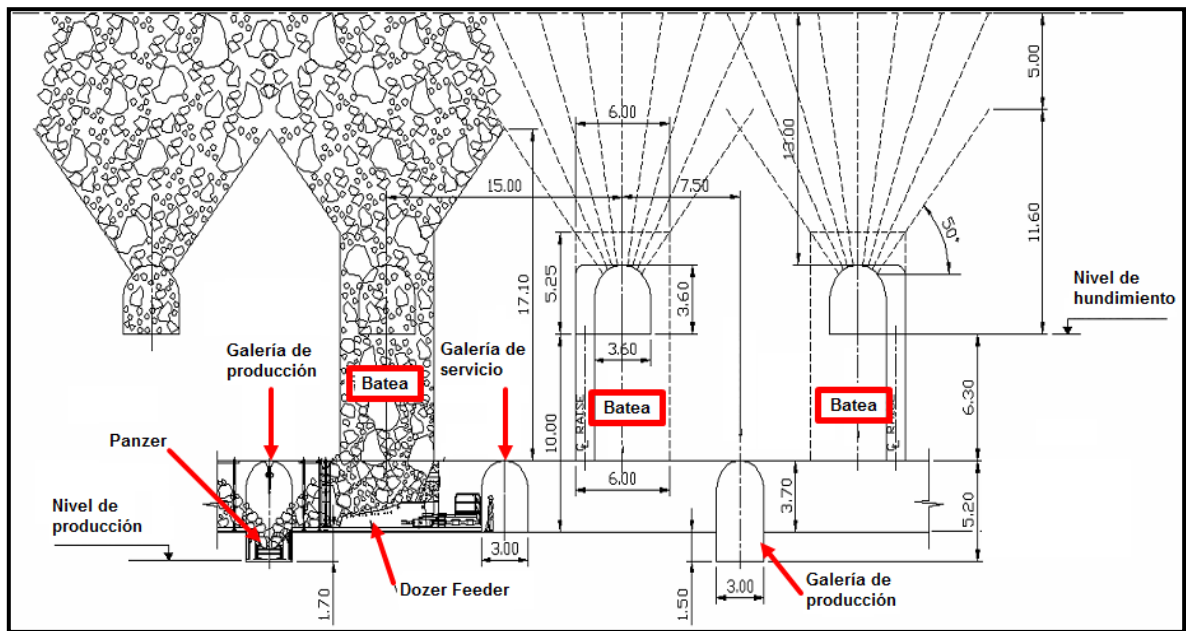


Figura A.1. Perfil del sistema de Minería Continua mostrando la conceptualización y el diseño de la socavación planeada para el módulo a desarrollar en División Andina de CODELCO

Anexo B: Detalle Pruebas de Carga Puntual

Tabla B.1. Resultados de pruebas de carga puntual para material empleado en pruebas de pilotaje

Distancia entre puntas (D) [mm]	Ancho superior [mm]	Ancho inferior [mm]	Ancho Promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [N]	Fuerza de Ruptura [KN]	De ² [mm ²]	De [mm]	Índice de Carga Puntual (Is) [MPa]	Factor de Corrección (F)	Índice de Carga Puntual (Is50) [MPa]
23	60	30	45	7.580	7,58	1.757	42	4,31	0,92	3,98
18	50	40	45	7.630	7,63	1.146	34	6,66	0,84	5,59
30	60	30	45	8.310	8,31	2.292	48	3,63	0,98	3,56
16	60	45	52,5	9.660	9,66	1.222	35	7,90	0,85	6,73
20	55	30	42,5	10.660	10,66	1.401	37	7,61	0,88	6,68
22	50	30	40	9.420	9,42	1.401	37	6,73	0,88	5,90
25	65	40	52,5	15.470	15,47	2.069	45	7,48	0,96	7,17
21	65	40	52,5	7.670	7,67	1.738	42	4,41	0,92	4,07
15	60	40	50	9.900	9,9	1.146	34	8,64	0,84	7,25
17	50	35	42,5	8.800	8,8	1.082	33	8,13	0,83	6,74
19	55	40	47,5	12.140	12,14	1.331	36	9,12	0,87	7,92
20	62	19	40,5	7.530	7,53	1.579	40	4,77	0,90	4,30
21	46	26	36	12.230	12,23	1.230	35	9,94	0,85	8,48
12	55	20	37,5	8.110	8,11	840	29	9,65	0,78	7,55
15	60	13	36,5	7.280	7,28	1.146	34	6,35	0,84	5,33
17	44	21	32,5	9.290	9,29	952	31	9,75	0,80	7,85
									Promedio	6,2

Anexo C: Granulometría G2 – PMCHS

Esta granulometría escogida se basa en un informe desarrollado por SRK Consulting (Canada) Inc. (2009) para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) de División CODELCO Norte. Se ha tomado en consideración para el trabajo de tesis el dominio Americana Sur, del Nivel 1 del PMCHS. La Figura C.1 muestra la ubicación de los dominios estructurales.

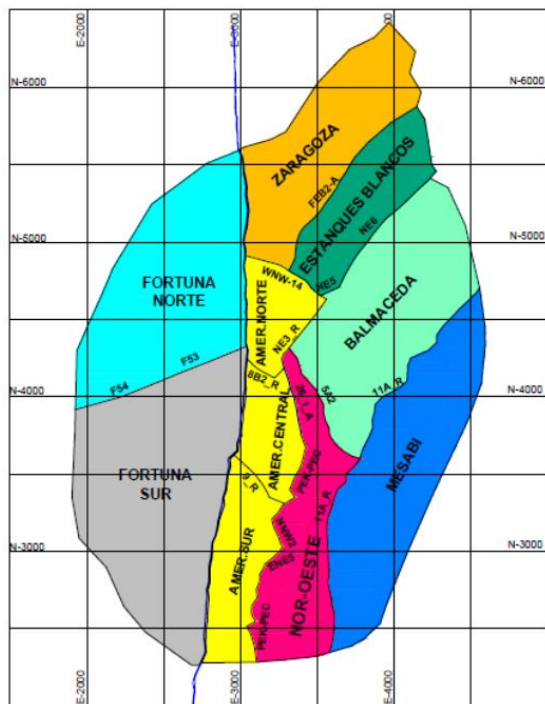


Figura C.1. Dominios estructurales en nivel 1 (cota 1841 msnm) del proyecto PMCHS

Análisis de Fragmentación

Se usa el código de Fragmentación de Hundimiento de Bloque (BCF v3.05) para los análisis de fragmentación. El BCF requiere que se ingresen datos en tres archivos: Datos de Geología, Datos de Caverna y Datos de Extracción.

El archivo de datos de geología contiene información acerca de la roca intacta, bloque de roca y condiciones de masa de roca, así como datos sobre los conjuntos de diaclasas seleccionados. El archivo de caverna contiene datos sobre la cara de la caverna y el esfuerzo que actúa sobre ella. Los archivos de Geología y Caverna se usan para calcular la fragmentación primaria.

El archivo de datos de extracción contiene datos sobre las columnas de extracción, la tasa de extracción y las dimensiones de las bateas. El archivo de Extracción, junto con los resultados de fragmentación primaria, se usa para calcular la fragmentación secundaria y las colgaduras.

Resultados de Fragmentación Secundaria y Colgadura

Fueron corridas 228 simulaciones de fragmentación secundaria. La Figura C.2 se muestra el caso de granulometría a emplear en tesis (curva #5).

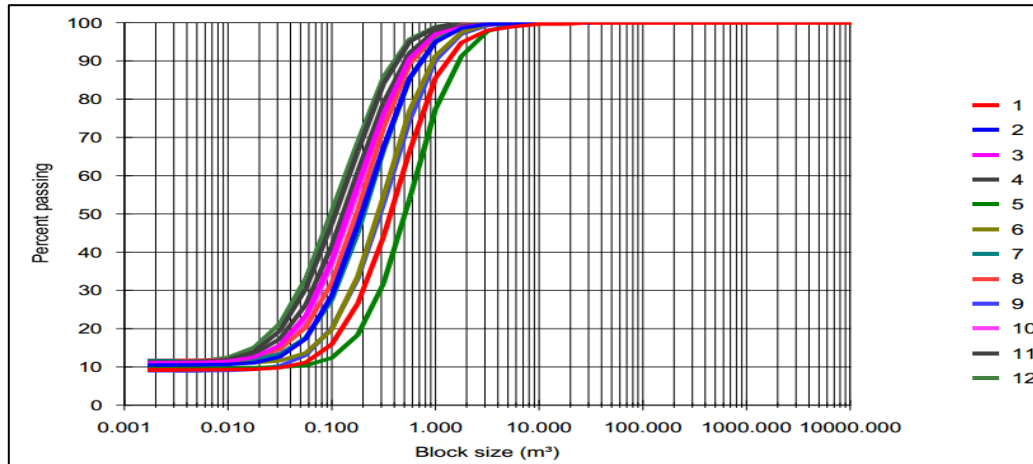


Figura C.2. Sector Americana Sur PMCHS: Nivel 1 (cota 1841 msnm)-Rangos de fragmentación secundaria Pórfido Este Potásico (PEK)

Metodología de conversión de distribuciones de tamaño de partículas

La metodología para pasar desde un tamaño en m^3 a m se resume a continuación:

1. Se suponen factores de forma de las partículas:

$$L_1:L_2:L_3 = 1:2:4,46 \quad \text{Ecuación C.1}$$

2. Se estima el diámetro medio como:

$$d_c = \frac{(L_1+L_2+L_3)}{3} \quad \text{Ecuación C.2}$$

3. Luego, reemplazando las relaciones de los factores de forma en función de L_2 :

$$d_c[m] = \frac{(L_1+L_2+L_3)}{3} = \frac{(\frac{L_2}{2}+L_2+2,23*L_2)}{3} = 1,24 * L_2 \quad \text{Ecuación C.3}$$

4. El volumen que pretende ser convertido puede ser estimado a su vez como:

$$V [m^3] = L_1 * L_2 * L_3 = 1,12 * (L_2)^3 \quad \text{Ecuación C.4}$$

5. Por lo que d_c , es decir, el tamaño buscado en unidades de m puede ser estimado como:

$$d_c = 1,24 * \sqrt[3]{\frac{V}{1,12}} \quad \text{Ecuación C.5}$$

Anexo D: Detalle Sistema de Sensado

Disposición de los componentes del sistema

La imagen adquirida por el sistema de sensado es una matriz de tamaño $N \times M$ en formato RGB. De la matriz obtenida, se utiliza el canal del color rojo donde la matriz $L[x,y]$ corresponde al nivel de luminosidad, en cuyo caso x es el ancho de la imagen e y es el alto de la imagen.

Cada celda de la matriz $L[x,y]$ es comparada con un valor dado de un nivel de umbral (TH) para discriminar si el punto en evaluación es parte de la línea roja o no. Un arreglo de puntos es obtenido con las coordenadas de la línea de luz. Basándose en los puntos obtenidos, una polilínea es generada para reconstruir la línea de luz roja y con eso reconstruir el contorno del objeto para el actual fotograma o imagen estática.

Conversión y Calibración

Debido a la simplicidad del sistema diseñado, los métodos para conversión y calibración propuestos utilizan bloques patrones con dimensiones específicas con el objetivo de convertir los valores en píxeles a medidas reales. Con estos bloques patrones se obtienen distintos puntos de referencia.

La conversión desde una medida en píxeles a una real de cierto punto en el contorno reconstruido es calculada usando una ecuación que define una cierta figura geométrica. Dependiendo de la figura geométrica a utilizar se requiere una cierta cantidad total de puntos de referencia. Por ejemplo: para una línea recta, por lo menos dos puntos de referencia son necesarios y para una línea curva por lo menos tres puntos son necesarios.

Debido a la curvatura del lente de una cámara, la imagen adquirida posee una curvatura heredada, y por esto una línea curva es utilizada para convertir los valores en píxeles a medidas físicas reales.

Para tres puntos de referencia dados $R_0(x_0, y_0)$, $R_1(x_1, y_1)$ y $R_2(x_2, y_2)$, la ecuación de segundo orden que calcula un punto $P(x,y)$ es mostrada en la Ecuación D.1. El valor de y es para la dimensión real y el valor de x es para la dimensión en píxel.

$$y(x) = ax^2 + bx + c \quad \text{Ecuación D.1}$$

Este método de conversión es aplicable para ambos ejes: alto y ancho de la imagen.

Usando los tres puntos de referencia R_0 , R_1 y R_2 , el problema puede ser expresado con un sistema de ecuaciones lineales donde los coeficientes (a, b, c) pueden ser calculados resolviendo la Ecuación D.2.

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0^2 & x_0 & 1 \\ x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación D.2}$$

Debido a que la información que es enviada al sistema de control consiste en la altura media y máxima, solamente la altura del contorno es calibrada y convertida a un largo real.

Calibración

Para efectos de la calibración, R_0 corresponde a la superficie del Panzer (altura cero). Para los puntos de referencia R_1 y R_2 , se han construido dos bloques patrones con alturas de 10 mm y 20 mm, respectivamente.

Los puntos de calibración resultantes corresponden a:

- $R_0 = (82, 0)$
- $R_1 = (129, 10)$
- $R_2 = (182, 20)$

Resolviendo la Ecuación 2 con estos valores, los coeficientes calculados son:

- $a = -0,000240867$
- $b = 0,26358892$
- $c = -19,99470092$

La Ecuación 3 representa la función de conversión para esta prueba.

$$y(x) = -0,00024x^2 + 0,26359x - 19,9947 \quad \text{Ecuación D.3}$$

Pruebas

Prueba de precisión

Para la prueba de precisión, el objetivo es estimar el error medio absoluto porcentual (MAPE) del algoritmo de reconstrucción y conversión, utilizando el mismo bloque patrón con que el sistema ha sido calibrado, es decir, el objetivo es estimar el error del sistema de sensado.

En la prueba, un bloque es ubicado sobre el Panzer realizando mediciones consecutivas de la altura mediante el sistema de sensado. Este proceso es efectuado para ambos bloques patrones de 10 mm y 20 mm de altura.

Los resultados para esta prueba son mostrados en la Tabla D.1. Como se puede ver, el error medio es inferior al 5% para ambas pruebas.

Tabla D.1. Resultados de la prueba de precisión

Muestra	y_{10}		y_{20}	
	y [mm]	MAPE [%]	y [mm]	MAPE [%]
1	9,79832	2,06%	20,6998	3,38%
2	10,00000	0,00%	19,6472	1,80%
3	10,20120	1,97%	20,5256	2,56%
4	10,40190	3,86%	19,6472	1,80%
5	11,39830	12,27%	20,6998	3,38%
6	11,20000	10,71%	20,1757	0,87%
7	11,20000	10,71%	20,0000	0,00%
8	10,20120	1,97%	19,6472	1,80%
9	9,79832	2,06%	19,8239	0,89%
10	10,20120	1,97%	20,8735	4,18%
Media	10,44004	4,76%	20,1740	2,07%

Estos valores son bastantes satisfactorios para el objetivo del sistema de sensado. Por otro lado, si más puntos de referencia fueran utilizados se espera que estos resultados y la precisión del sistema se incremente, especialmente para el caso de y_{10} .

La Figura D.1 muestra el modelo reconstruido para ambos bloques patrones. El ruido que se observa bajo los 5 mm es debido a que los bloques patrones son de material acrílico transparente y algo de la luz es reflejada en los otros lados de los bloques. Para materiales sólidos como piedras, este ruido es prácticamente nulo.



Figura D.1. Modelos reconstruidos para prueba de precisión

Prueba de reconstrucción

Para la prueba de reconstrucción, el objetivo es comparar el modelo reconstruido y generado por el sistema con objetos reales. Es necesario explicitar que estos resultados deben ser comparados de una manera cualitativa debido a la implementación de la prueba y cómo los datos son presentados en el sistema.

Prueba de un objeto: en esta prueba una piedra es ubicada sobre el Panzer con el fin de obtener su modelo reconstruido.

En la Figura D.2 se muestra el objeto utilizado en la prueba y la medida obtenida por el lado que se supone será la altura máxima. Como se puede ver, la medida es cercana a los 20 mm. Un pie de metro se utiliza para medir y el valor es de 19,7 mm.



Figura D.2. Roca utilizada en la prueba de reconstrucción de un objeto

Por otro lado, la Figura D.3 muestra el modelo reconstruido y generado para esta prueba.

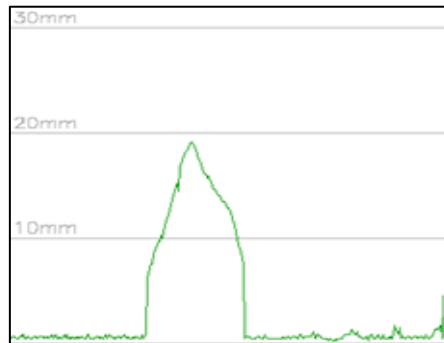


Figura D.3. Modelo reconstruido para prueba de reconstrucción de un objeto

Comparando las Figuras D.2 y D.3, se puede concluir que la altura máxima del objeto real y el modelo reconstruido están bajo el margen de error esperado.

Prueba de múltiples objetos: en esta prueba tres rocas son ubicadas sobre el Panzer para obtener su modelo reconstruido. La Figura D.4 muestra las tres rocas utilizadas en esta prueba. Estas han sido escogidas por su altura y forma similar con el fin de comparar cada modelo de reconstrucción generado por el sistema.



Figura D.4. Rocas utilizadas para la prueba de reconstrucción de múltiples objetos

La Figura D.5 muestra el modelo reconstruido y generado en esta prueba.

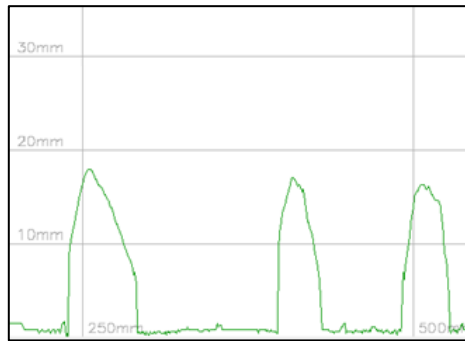


Figura D.5. Modelo reconstruido para la prueba de reconstrucción de múltiples objetos

Comparando las Figuras D.4 y D.5, se puede concluir que la forma y altura de los objetos reales y los modelos reconstruidos están bajo el margen de error esperado.

Anexo E: Detalle Sistema de Control

Estimación de carga en el Panzer

La distribución de carga en el Panzer se modela como una suma de gaussianas distribuidas espacialmente en el Panzer. Este modelo permite aproximar cualquier forma presente en el Panzer⁸. El modelo de distribución de carga en el Panzer utiliza la información a priori de las descargas de los Dozer, creando una gaussiana por cada descarga ubicada en la posición en que éste se encuentra. Adicionalmente, toda la distribución de carga en el Panzer se desplaza de acuerdo con su velocidad de desplazamiento.

La información a priori del modelo de la distribución de carga en el Panzer, en conjunto con la información sensorial de carga puntual se fusiona utilizando un filtro bayesiano⁹. El resultado obtenido de esta estimación corresponde a un modelo de la distribución de carga en el Panzer que considera el desplazamiento del transportador cuando cada Dozer realiza una descarga, y que se corrige utilizando la información sensorial disponible de la carga puntual en algunas posiciones a lo largo de la galería de producción.

Optimización de la utilización del Panzer

El objetivo de la operación es utilizar el Panzer de la forma más eficiente posible. Para esto, los Dozer descargan en el Panzer cada vez que su tasa de extracción estimada es menor a su tasa de extracción deseada y además, en su ubicación hay espacio suficiente para su descarga estimada. Se entiende que hay espacio suficiente cuando la suma entre lo que lleva el Panzer y lo que descargaría el Dozer en esa ubicación está por debajo de un umbral.

Esta técnica genera una utilización del Panzer completa, sin embargo, genera asimetrías en la descarga de cada punto de extracción. Para solucionar esto y adicionalmente permitir controlar las tasas de extracción para cada punto se define una capacidad de carga reservada.

Capacidad de carga reservada

Para permitir el cumplimiento de las tasas de extracción establecidas, se define una distribución de carga reservada, la que permite reservar espacio en el Panzer para que los Dozer finales puedan descargar. La capacidad de carga reservada se modela como una suma de gaussianas que son inyectadas en la posición inicial del Panzer y son eliminadas al llegar al Dozer que necesita el espacio reservado. Este modelo no sufre ninguna alteración a medida que el Panzer se desplaza.

Las gaussianas que representan cargas reservadas son inyectadas para un Dozer seleccionado de forma aleatoria, cuya probabilidad de selección depende de cuán lejos está de su tasa de extracción establecida.

⁸ Hangelbroek, T. ;Ron, A. (2009). "Nonlinear Approximation Using Gaussian Kernels". URL: <http://arxiv.org/abs/0911.2803>

⁹ Diard, Julien; Bessière, Pierre; Mazer, Emmanuel (2003). "A survey of probabilistic models, using the Bayesian Programming methodology as a unifying framework" URL: <http://cogprints.org/3755/1/Diard03a.pdf>

Anexo F: Ajustes Estadísticos en Caracterización de Sistema Dozer-Panzer

Se presentan los resultados de los ajustes de distribuciones de probabilidad a los datos de largos de descarga Dozer y productividad Dozer.

Largo de Descarga Dozer – Experimento 2.1

Weibull	
minimum	= 0 [fixed]
alpha	= 2.02556
beta	= 10.7849
Chi Squared	
total classes	10
interval type	equal probable
net bins	10
chi**2	5.2
degrees of freedom	9
alpha	0.05
chi**2(9,0.05)	16.9
p-value	0.817
result	DO NOT REJECT
Kolmogorov-Smirnov	
data points	400
ks stat	0.0432
alpha	0.05
ks stat(400,0.05)	0.0675
p-value	0.428
result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	
data points	400
ad stat	0.852
alpha	0.05
ad stat(0.05)	2.49
p-value	0.445
result	DO NOT REJECT

Figura F.1. Resultados de ajuste Weibull para largos de descarga de Dozer, Experimento 2.1 de Sistema de Minería Continua

Productividad Dozer – Experimento 2.1

Exponential	
minimum	= 0 [fixed]
beta	= 9.54347
Chi Squared	
total classes	10
interval type	equal probable
net bins	10
chi**2	9.5
degrees of freedom	9
alpha	0.05
chi**2(9,0.05)	16.9
p-value	0.392
result	DO NOT REJECT
Kolmogorov-Smirnov	
data points	400
ks stat	0.0323
alpha	0.05
ks stat(400,0.05)	0.0675
p-value	0.783
result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	
data points	400
ad stat	0.349
alpha	0.05
ad stat(0.05)	2.49
p-value	0.897
result	DO NOT REJECT

Figura F.2. Resultados de ajuste Exponencial productividades de Dozer, Experimento 2.1 de Sistema de Minería Continua

Largo de Descarga Dozer – Experimento 2.2

Erlang	
minimum	= 0 [fixed]
m	= 4
beta	= 2.07156
Chi Squared	
total classes	10
interval type	equal probable
net bins	10
chi**2	37.9
degrees of freedom	9
alpha	0.05
chi**2(9,0.05)	16.9
p-value	1.78e-05
result	REJECT
Kolmogorov-Smirnov	
data points	400
ks stat	0.0814
alpha	0.05
ks stat(400,0.05)	0.0675
p-value	0.00932
result	REJECT
Anderson-Darling	
data points	400
ad stat	3.22
alpha	0.05
ad stat(0.05)	2.49
p-value	0.0212
result	REJECT

Figura F.3. Resultados de ajuste Erlang para largos de descarga de Dozer, Experimento 2.2 de Sistema de Minería
Continua

Productividad Dozer – Experimento 2.2

Weibull	
minimum	= 0 [fixed]
alpha	= 1.30936
beta	= 10.8487
Chi Squared	
total classes	10
interval type	equal probable
net bins	10
chi**2	5
degrees of freedom	9
alpha	0.05
chi**2(9,0.05)	16.9
p-value	0.834
result	DO NOT REJECT
Kolmogorov-Smirnov	
data points	400
ks stat	0.0343
alpha	0.05
ks stat(400,0.05)	0.0675
p-value	0.72
result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	
data points	400
ad stat	0.522
alpha	0.05
ad stat(0.05)	2.49
p-value	0.725
result	DO NOT REJECT

Figura F.4. Resultados de ajuste Weibull productividades de Dozer, Experimento 2.2 de Sistema de Minería Continua

Anexo G: Algoritmo de Generación de Secuenciamiento Dozer

A continuación se despliega el algoritmo desarrollado para la obtención de las secuencias de activación de Dozer:

1. Selección de la configuración de operación: existen seis posibles (tres principales, cada una con Turno A y Turno B).
2. Determinación de los largos de descarga medios asociados a los Dozer operativos de la configuración (datos de Experimentos 2.1 y 2.2, Capítulo 4).
3. Determinación de la distancia entre las galerías de los Dozer operativos: aquí se emplean las distancias acumuladas medidas desde la descarga del material al final del Panzer. La Tabla G.1 ilustra dichas distancias.

Tabla G.1. Posición de galerías Dozer en modelo físico

Dozer	x (distancia acumulada desde descarga de material al final del Panzer) [cm]
1	144,1
2	110,0
3	75,7
4	41,4
5	128,5
6	94,7
7	60,4
8	26,0

4. Determinación del tiempo de ciclo global del sistema para la configuración de operación: se estima este tiempo mediante la Ecuación G.1:

$$t_{g,i} = \frac{\sum_j L_{d,j}}{v_p}, \text{ para } i \in \{I, II, III\}; j \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\} \quad \text{Ecuación G.1}$$

donde $t_{g,i}$ es el tiempo de ciclo global del sistema para la configuración i , $L_{d,j}$ es el largo medio de descarga del Dozer j y v_p es la velocidad del Panzer. Cabe notar que para la notación de los largos de descarga, el Dozer j representa el número de Dozer en relación a su ubicación en la calle Panzer. La sumatoria de la expresión tiene cuatro elementos asociados a los largos de descarga de los Dozer operativos de la configuración i .

Dadas las unidades de cm para los largos medios de descarga y de cm/s para la velocidad del Panzer, los tiempos globales implementados están en unidades de segundo.

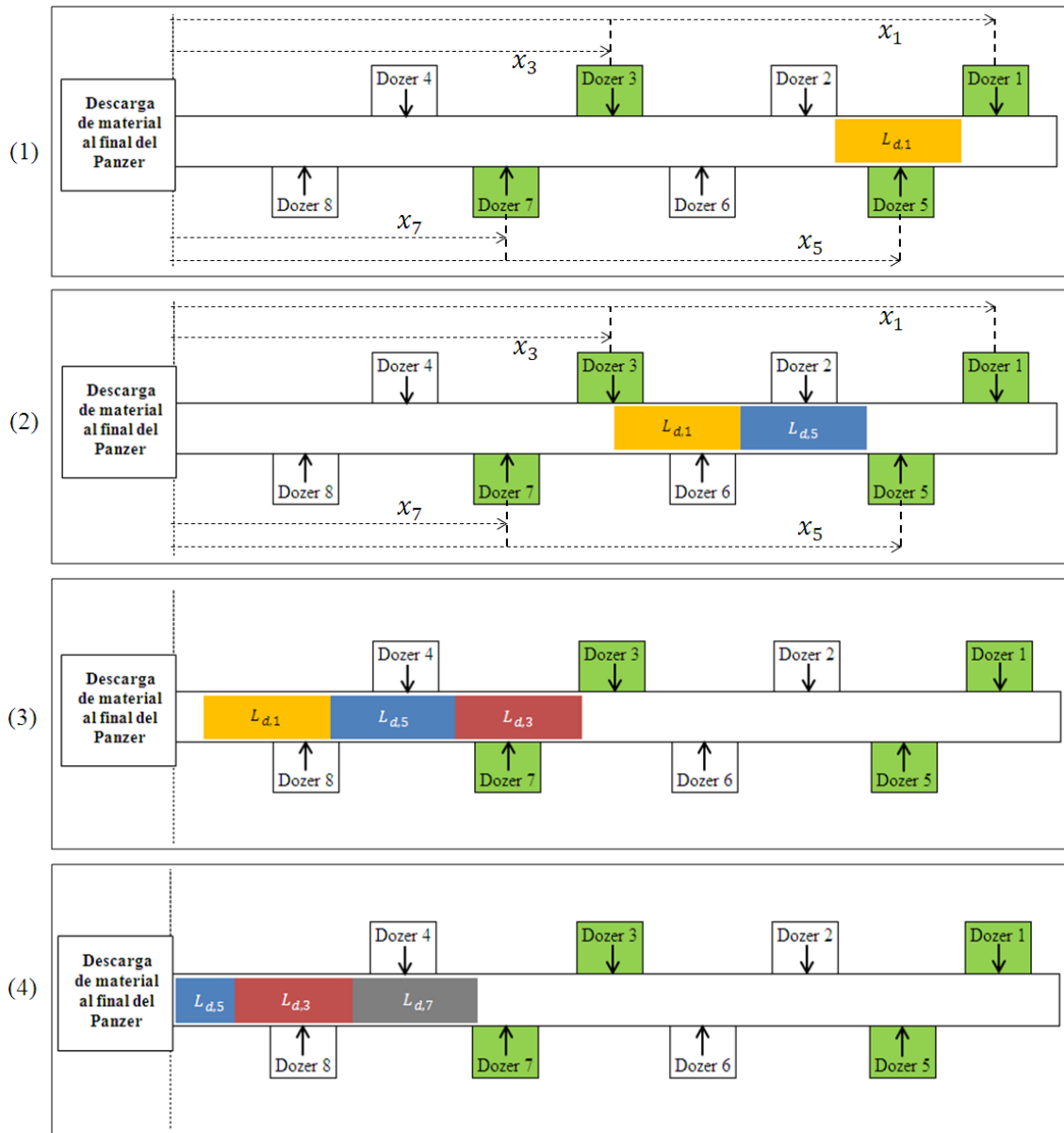
5. Determinación de los desfases en cuanto a tiempos de activación en secuencia para cada Dozer: los desfases de cada Dozer se calculan con la Ecuación G.2:

$$t_{j,i} = \text{mod} \left(\frac{x_{m,i} - x_{j,i} + \sum_k L_{d,k}}{t_{g,i}} \right), \text{ para } i \in \{I, II, III\}; j \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\} \quad \text{Ecuación G.2}$$

donde $t_{j,i}$ es el tiempo de desfase del Dozer j para la configuración de operación i (considerando separadamente Turno A y Turno B); $x_{m,i}$ es la posición de la galería Dozer más alejada para la configuración i (ver Tabla G.1); $x_{j,i}$ es la posición del Dozer j para la configuración i ; $t_{g,i}$ es el tiempo de ciclo global del sistema para la configuración seleccionada i ; y la sumatoria planteada representa, mediante el subíndice k , la suma de los largos de descarga de los Dozer aguas arriba del Dozer j , esto es, de aquellos Dozer k tal que $x_{k,i} > x_{j,i}$. Destacar que mod hace referencia al residuo/resto resultante de la razón mostrada en la expresión anterior, lo que equivale a un proceso de normalización de los desfases por el tiempo de ciclo global del sistema.

Para ilustrar de mejor manera lo anterior, en la Figura G.1 se aprecia cómo sería una secuencia de activación para un ciclo global del sistema de la configuración Tipo I en Turno A, y en caso de no considerar normalización por el tiempo de ciclo global, es decir, Dozer descargan en orden desde el más lejano a la descarga al final del Panzer al más cercano a dicha ubicación. Se puede apreciar que la aplicación de la fórmula de los desfases en este caso queda:

1. Dozer de configuración Tipo I ordenados de manera decreciente en cuanto a sus distancias $x_{j,i}$: 1, 5, 3 y 7.
2. Desfase inicial de Dozer 1 es 0 s, pues es el primero en descargar (caso (1)). Notar que en cada configuración siempre se cumple que el desfase temporal del Dozer más alejado con el que se inicia la secuencia es 0 s.
3. Dozer 5 debe esperar un tiempo asociado a la diferencia entre las distancias $x_{1,\text{Tipo I}}$ y $x_{5,\text{Tipo I}}$, sumado al largo de la descarga del Dozer 1 (caso (2)).
4. Dozer 3 debe esperar el tiempo asociado a la diferencia entre las distancias $x_{1,\text{Tipo I}}$ y $x_{3,\text{Tipo I}}$, sumando los largos de las descargas efectuadas por Dozer 1 y 5 (caso (3)).
5. Finalmente, el Dozer 7 espera un tiempo equivalente a la diferencia entre las distancias $x_{1,\text{Tipo I}}$ y $x_{7,\text{Tipo I}}$, además de agregarle los largos de las descargas de los Dozer 1, 5 y 3 (caso (4)).



G.1. Ejemplo de secuencia de descarga de Dozer para configuración Tipo I en Turno A

La Tabla G.2 muestra los resultados de los desfases temporales normalizados calculados para el caso de operar con máximo cuatro Dozer simultáneamente. Las Tablas G.3 y G.4 muestran los desfases temporales para el caso de operar con más de cuatro Dozer simultáneos y de estar con una Granulometría G2, respectivamente.

A modo de ejemplo de una secuencia normalizada, tomando en cuenta la Tabla G.2, considerando la configuración Tipo I en Turno A, el primer Dozer en descargar es el 1 en el tiempo $t = 0$ s, posteriormente se activa el Dozer 3 en $t = 11,3$ s, siguiéndole el Dozer 5 en $t = 14,2$ s, y el Dozer 7 en $t = 29,4$ s. Se identifica que los desfases están normalizados por el hecho que no descargan en orden: Dozer 3, con un valor x_3 menor al del Dozer 5 descarga antes que este último. El tiempo de ciclo global del sistema indica el intervalo de tiempo existente entre descargas de un mismo Dozer posterior a iniciada la secuencia.

Tabla G.2. Desfases temporales empleados para cada Dozer y configuración con máximo cuatro Dozer operativos simultáneos y Granulometría G1

Configuración	Turno	Dozer Operativos	Escala laboratorio		Escala real	
			Desfase [s]	Ciclo global del sistema [s]	Desfase [min]	Ciclo global del sistema [min]
Tipo I	A	1	0,0	36,3	0,0	4,3
		3	11,3		1,3	
		5	14,2		1,7	
		7	29,4		3,5	
	B	2	0,0	36,0	0,0	4,2
		4	13,1		1,5	
		6	14,8		1,7	
		8	29,3		3,5	
Tipo II	A	1	0,0	37,3	0,0	4,4
		3	11,1		1,3	
		6	30,2		3,6	
		8	8,1		1,0	
	B	2	17,3	35,1	2,0	4,1
		4	32,1		3,8	
		5	0,0		0,0	
		7	13,1		1,5	
Tipo III	A	2	0,0	37,7	0,0	4,4
		3	33,0		3,9	
		6	14,8		1,7	
		7	13,4		1,6	
	B	1	17,3	35,3	0,0	4,1
		4	21,8		3,4	
		5	0,0		1,7	
		8	2,7		1,3	

Tabla G.3. Desfases temporales empleados para cada Dozer considerando más de cuatro Dozer operativos simultáneos y Granulometría G1

Experimento	Dozer Operativos	Escala laboratorio		Escala real	
		Desfase [s]	Ciclo global del sistema [s]	Desfase [min]	Ciclo global del sistema [min]
5	2	17,3	46,3	2,0	5,5
	3	4,0		0,5	
	5	0,0		0,0	
	6	32,0		3,8	
	7	22,1		2,6	
6	2	17,3	55,2	2,0	6,5
	3	50,2		5,9	
	4	32,1		3,8	
	5	0,0		0,0	
	6	32,0		3,8	
	7	13,1		1,5	
7	1	0,0	62,1	0,0	4,4
	2	31,5		3,7	
	3	2,4		0,3	
	4	39,5		4,7	
	5	14,2		1,7	
	6	46,2		5,4	
	7	20,5		2,4	
8	1	0,0	72,4	0,0	8,5
	2	31,5		3,7	
	3	64,4		7,6	
	4	29,2		3,4	
	5	14,2		1,7	
	6	46,2		5,4	
	7	10,2		1,2	
	8	45,4		5,4	

Tabla G.4. Desfases temporales empleados para cada Dozer en caso de usar Granulometría G2

Configuración	Dozer Operativos	Escala laboratorio		Escala real	
		Desfase [s]	Ciclo global del sistema [s]	Desfase [min]	Ciclo global del sistema [min]
Tipo III-Turno A	2	0,0	30,2	0,0	3,6
	3	1,0		0,1	
	6	15,0		1,8	
	7	17,4		2,0	
Tipo III-Turno B	1	0,0	32,3	0,0	3,8
	4	30,6		3,6	
	5	14,3		1,7	
	8	14,6		1,7	
5 Dozer	2	16,3	37,8	1,9	4,4
	3	9,7		1,1	
	5	0,0		0,0	
	6	31,3		3,7	
	7	26,1		3,1	
6 Dozer	2	16,3	46,9	1,9	5,5
	3	0,6		0,1	
	4	32,0		3,8	
	5	0,0		0,0	
	6	31,3		3,7	
	7	17,0		2,0	
7 Dozer	1	0,0	53,8	0,0	6,3
	2	30,6		3,6	
	3	8,0		0,9	
	4	39,3		4,6	
	5	14,3		1,7	
	6	45,5		5,4	
	7	24,4		2,9	
8 Dozer	1	0,0	62,5	0,0	7,4
	2	30,6		3,6	
	3	61,7		7,3	
	4	30,6		3,6	
	5	14,3		1,7	
	6	45,5		5,4	
	7	15,6		1,8	
	8	46,9		5,5	

Anexo H: Test de Significancia Estadística

Aquí se presentan los test estadísticos T de Student y F de Fisher para el par de datos de granulometrías empleado.

Tabla H.1. Test de Fisher para experimentos de caracterización de sistema Dozer-Panzer

<i>Fisher</i>	<i>G1</i> [t/ciclo]	<i>G2</i> [t/ciclo]
Media	9,543	9,99
Varianza	86,44	60,39
Observaciones	400	400
Grados de libertad	399	399
F	1,43	
P(F<=f) una cola	0,000177	
Valor crítico para F (una cola)	1,179260	

Tabla H.2. Test de Student para experimentos de caracterización de sistema Dozer-Panzer

<i>Student</i>	<i>G1</i> [t/ciclo]	<i>G2</i> [t/ciclo]
Media	9,54	9,99
Varianza	86,44	60,39
Observaciones	400	400
Coefficiente de correlación de Pearson	- 0,00164972	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	399	
Estadístico t	-0,73277583	
P(T<=t) una cola	0,23206271	
Valor crítico de t (una cola)	1,64868153	
P(T<=t) dos colas	0,46412542	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96592722	

Anexo I: Regresión Lineal de Productividad y Utilización

Se presentan los resultados de la regresión efectuada en cuanto a utilización del Panzer en función de la productividad.

Tabla I.1. Estadísticas de regresión

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,779
Coefficiente de determinación R ²	0,608
R ² ajustado	0,605
Error típico	4,511
Observaciones	144

<i>Análisis de varianza</i>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	4473,467	4473,467	219,836	1,228E-30
Residuos	142	2889,564	20,349		
Total	143	7363,032			

<i>Estadísticas de los coeficientes</i>						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	76,431	1,231	62,074	8,622E-105	73,997	78,865
Productividad	0,020	0,001	14,826	1,2285E-30	0,017	0,022