



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

**DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE UN NUEVO
SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE PARA LA MINERÍA DE
HUNDIMIENTO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CHANG JA KIM

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
ANDRÉS SUSAETA MARGULIS**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL DE MINAS

POR: CHANG JA KIM

PROF. GUÍA: RAÚL CASTRO R.

En la minería subterránea el manejo de minerales es una de las actividades más incidentes en la productividad y el costo de operación de la mina, principalmente por la gran cantidad y variabilidad de recursos involucrados. Es por esto que, en los últimos años, gran parte de las innovaciones tecnológicas apuntan a esta actividad.

A medida que las operaciones mineras mediante block caving se han ido profundizando, se ha encontrado con la presencia de rocas más competentes, conocidas localmente como roca primaria, caracterizada por resultar en una granulometría mayor con respecto a la roca secundaria. Esto ha generado un impacto negativo en la productividad de los sectores productivos. Por estas razones, la motivación de este trabajo de título fue buscar una mejora de los parámetros productivos mediante el uso de un transportador de cadenas o Panzer. Se plantearon diseños que consideran su uso en un nivel de acarreo, alimentado por equipos discretos LHD's mediante un pique de traspaso de corta longitud. Para ello, fue necesario desarrollar una metodología para determinar el diseño óptimo para una capacidad productiva determinada. Así, se obtuvieron diferentes diseños geométricos para distintas capacidades de LHD, determinados por el número y longitud de calles relacionadas a un Panzer, y el largo necesario del equipo Panzer.

Ya una vez con los diseños, se pudo evaluar teóricamente la capacidad productiva, obteniéndose valores de rendimiento de palas sobre 300 tph y velocidades de extracción por sobre los 2,0 (t/m²d), dependiendo de algunos factores como la disponibilidad, utilización, el diseño de malla de extracción y de la capacidad del equipo LHD.

Para poder aumentar la productividad de las palas LHD fue necesario optar por diseños con longitudes de calles de producción cortas, en torno a los 50 (m), minimizando así la distancia media de acarreo. En otras palabras, se transfiere gran parte de la labor de acarreo de minerales de las palas al Panzer. La distancia media de acarreo de las palas se puede considerar como una condición para obtener los diseños LHD-Panzer.

La confiabilidad de los diseños, desarrollado en un capítulo anexo, muestra que es improbable llegar a la meta productiva bajo índices productivos altos de rendimiento de palas y velocidad de extracción. Luego, para mejorar la productividad no solo basta con mejorar los diseños, sino también todas aquellas actividades, como el cachorreo y la fortificación por mencionar algunos, que son complementarias en la actividad minera.

ABSTRACT

In underground mining, the ore handle system is one of the activities that most impact the production system and mining operation cost, mainly because of the large number and variability of involved resource. That is why in recent years most of the technological innovations aimed at this activity.

As the block caving mining operations have gone deeper, the presence of more competent rocks, locally known as primary rock and characterized by a higher particle size than secondary rock, is more frequent. This has a negative impact on productivity in productive sectors. For these reasons, the motivation for this thesis was seeking better productive parameters using a chain conveyor or Panzer. Designs were proposed in order to consider their use in a haulage level, fed by discrete LHD equipments through a short length shift. It was necessary to develop a methodology to determine the optimal design for a given production capacity. Thus, different geometric patterns were obtained for different capacities of LHD, determined by the number and length of streets connected to a Panzer, and the length of the Panzer equipment.

Once with the LHD-Panzer designs, the productive capacity could be evaluated theoretically the productive capacity, obtaining values of LHD productive rate over 300 tph and extraction rate over 2.0 (t/m²d), depending on several factors including the availability and use of equipments, the design of the extraction level and the LHD carrying capacity.

To increase the productivity of the LHD, it was necessary to choose a design with shorter carrying distance around 50 (m), thus minimizing the average carrying distance of carry. In other words, it transfers much of the ore haulage activity from the LHD to the Panzer. The average hauling distance of the LHD can be seen as a condition for LHD-Panzer design.

The reliability of the designs, developed in a chapter appendix, shows us that it is improbable to reach a higher production rate by just changing the haulage level design. Then to improve the productivity of the block caving mining it is not enough to improve the haulage level design, but also all the complementary activities like secondary blast and fortification.

Índice de contenidos

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	3
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.4 ALCANCES	6
1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
1.6 CONTENIDO POR CAPÍTULO	8
CAPÍTULO 2.....	10
SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN LA MINERÍA DE BLOCK CAVING .	10
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN LA ACTUALIDAD	11
2.2.1 <i>Mina Henderson</i>	12
2.2.2 <i>Mina Northparkes E26 Lift2</i>	14
2.2.3 <i>Mina Palabora Subterránea</i>	15
2.2.4 <i>Mina Premier</i>	16
2.2.5 <i>Mina El Teniente</i>	17
2.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	22
CAPÍTULO 3.....	24
FACTORES QUE INCIDEN EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES Y ESTADO DEL ARTE DE LOS EQUIPOS LHD Y PANZER	24
3.1 INTRODUCCIÓN.....	24
3.2 FACTORES QUE INCIDEN EN LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES	25
3.3 CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS PARA EL MANEJO DE MINERALES.....	28
3.3.1 <i>Equipos LHD:</i>	29
3.3.2 <i>Equipo de transporte Panzer</i>	33
3.4 ÍNDICE DE VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN.....	37

3.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	39
CAPÍTULO 4.....		40
DISEÑO DE UN SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES COMPUESTA POR LHD Y PANZER.		40
4.1	INTRODUCCIÓN.....	40
4.2	CONFIGURACIONES DE DISEÑO.....	41
4.3	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES LHD-PANZER.	45
4.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	60
CAPÍTULO 5.....		61
ESTIMACIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DISEÑOS		61
5.1	INTRODUCCIÓN.....	61
5.2	ESTIMACIÓN DE COSTO PROMEDIO DE OPERACIÓN	61
5.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DISEÑOS	65
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	77
CAPÍTULO 6.....		78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		78
BIBLIOGRAFÍA.		81
ANEXOS.		84
	Anexo A: Cálculo de malla de extracción	84
	Anexo B: Estimación de rendimiento de los equipos.....	88
	Anexo C: Estimación de la utilización de los equipos LHD.	92
	Anexo D: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 1.....	98
	Anexo E: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 2.	110
	Anexo F: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 3.	114
	Anexo G: Estimación de la Confiabilidad del Diseño Minero.....	120
1	Estado del Arte de la Teoría de Confiabilidad	120
2	Aplicación de la teoría de confiabilidad a los diseños óptimos obtenidos para una configuración LHD-Panzer	128
3	Análisis de Sensibilidad	133

Índice de figuras

Figura 1: Esquema block caving mecanizado, Bell Mine, Canadá (Wattimena, 2003)	1
Figura 2: Ejemplo de malla Herringbone (Brown, 2003).....	12
Figura 3: Ejemplo de malla Herringbone ajustado (Brown, 2003)	12
Figura 4: Ejemplo de malla Henderson (Brown, 2003).....	12
Figura 5: Ejemplo de malla Teniente (Castro R., 2007).....	12
Figura 6: Sección general, Mina Henderson (Callahan et al, 2008).	13
Figura 7: Perfil del sistema de manejo de minerales en mina Northparkes.	15
Figura 8: Vista en planta del nivel de producción de la mina Palabora.	16
Figura 9: Esquema isométrico del sistema manejo minerales de Mina Pipa Norte.	18
Figura 10: Perfil del sistema de manejo de minerales de Reservas Norte.	19
Figura 11: Esquema sistema carguío y transporte Mina Esmeralda.	21
Figura 12: Vista perfil del sistema de manejo de minerales de El Salvador.	22
Figura 13: Perfil de un equipo LHD.	32
Figura 14: Vista de operación del equipo Panzer en minería metálica.	35
Figura 15: Esquema del sistema de manejo de minerales propuesto.....	41
Figura 16: Vista en planta de la configuración 1.....	42
Figura 17: Vista isométrica de la configuración 1.....	42
Figura 18: Vista en planta de la configuración 2.....	43
Figura 19: Vista isométrica de la configuración 2.....	43
Figura 20: Vista en planta de la configuración 3.....	43
Figura 21: Vista isométrica de la configuración 3.....	43
Figura 22: Ábaco de Laubscher para diseño de malla de extracción (Laubscher, 1994).	84
Figura 23: Vista en planta de cruzado producción y vista perfil de estocada (Sandvik).	86
Figura 24: Representación Curva de Bañera (Cornejo M, 2008).....	121
Figura 25: Configuración de los distintos sistemas (Cornejo, 2008).....	122
Figura 26: Ejemplo de Curva U.....	124
Figura 27: Curva PCC.....	125
Figura 28: Estimación de número de eventos mediante Curva U (Cornejo, 2008).	126
Figura 29: Estimación de confiabilidad desde curva PCC (Cornejo, 2008).....	127
Figura 30: Distribución de tonelaje de la PCC de una componente (Cornejo, 2008),	127

Índice de tablas

Tabla 1: Sistema de producción en minas explotadas mediante block caving (Rubio, 2006).....	11
Tabla 2: Parámetros de la roca y geométricos.....	26
Tabla 3 Resultados del estudio de la roca y geometría del yacimiento.	26
Tabla 4: Parámetros operacionales transportador de cadenas Panzer (IM2).	35
Tabla 5: Comparación cualitativa de las configuraciones de diseño.....	44
Tabla 6: Diseño de las malla de extracción a usar en el ejemplo.	50
Tabla 7: Ejemplo registros parciales de rendimiento del Panzer en El Salvador, mes de Marzo del 2007.	51
Tabla 8: Ejemplo registros parciales de rendimiento del Panzer en El Salvador, mes de Abril del 2007.	52
Tabla 9: Diseños resultantes para pala 4yd ³	54
Tabla 10: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 4 yd ³	54
Tabla 11: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 4 yd ³	55
Tabla 12: Diseños resultantes para pala 7 yd ³	55
Tabla 13: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 7 yd ³	55
Tabla 14: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 7 yd ³	56
Tabla 15: Diseños resultantes para pala 10 yd ³	56
Tabla 16: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 10 yd ³	56
Tabla 17: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 10 yd ³	57
Tabla 18: Diseños resultantes para pala 13 yd ³	57
Tabla 19: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 13 yd ³	57
Tabla 20: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 13 yd ³	58
Tabla 21: Parámetros de entrada considerados para los diseños óptimos.	58
Tabla 22: Resumen de los diseños óptimos.....	58
Tabla 23: Consideraciones para estimación de costo operación para LHD.....	62
Tabla 24: Costos de operación de palas LHD, provenientes de benchmarking.	62
Tabla 25: Resumen costo de operación por pala LHD.	63
Tabla 26: Resultados completo de diseños óptimos.	63
Tabla 27: Consideraciones de otro sistema de manejo de minerales.	64
Tabla 28: Evaluación de costo de operación para distintas alternativas de carguío a camión.....	64
Tabla 29: Estimación de costo de operación LHD-Panzer para un cruzado de producción.	65
Tabla 30: Táctica 1 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.	65
Tabla 31: Táctica 2 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.	66
Tabla 32: Táctica 3 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.	66
Tabla 33: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 7 yd ³	66
Tabla 34: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 7 yd ³	67
Tabla 35: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 10 yd ³	67
Tabla 36: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 10 yd ³	68
Tabla 37: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 10 yd ³	68

Tabla 38: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 13 yd ³	69
Tabla 39: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 1.	69
Tabla 40: Condiciones de parámetros para pala 4 yd ³ con táctica 2.....	70
Tabla 41: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 4 yd ³	70
Tabla 42: Condiciones de parámetros para pala 7 yd ³ con táctica 2.....	70
Tabla 43: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 7 yd ³	71
Tabla 44: Condiciones de parámetros para pala 10 yd ³ con táctica 2.....	71
Tabla 45: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 10 yd ³	71
Tabla 46: Condiciones de parámetros para pala 13 yd ³ con táctica 2.....	72
Tabla 47: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 13 yd ³	72
Tabla 48: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 2.	73
Tabla 49: Condiciones de parámetros para pala 4 yd ³ con táctica 3.....	73
Tabla 50: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 4 yd ³	73
Tabla 51: Condiciones de parámetros para pala 7 yd ³ con táctica 3.....	73
Tabla 52: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 7 yd ³	74
Tabla 53: Condiciones de parámetros para pala 10 yd ³ con táctica 3.....	74
Tabla 54: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 10 yd ³	74
Tabla 55: Condiciones de parámetros para pala 13 yd ³ con táctica 3.....	75
Tabla 56: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 13 yd ³	75
Tabla 57: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 3.	76
Tabla 58: Resumen final diseños óptimos.	76
Tabla 59: Dimensiones de equipo LHD y de galerías de producción.	85
Tabla 60: Largo de estocada de carguío	86
Tabla 61: Diseños de mallas para cada capacidad de LHD.	87
Tabla 62: Estimación de tiempo de carga y descarga para LHD.	88
Tabla 63: Parámetros para estimación rendimiento de LHD.....	89
Tabla 64: Datos de velocidades de palas Sandvik.	89
Tabla 65: Estimación de rendimiento de LHD de 4 yd ³	90
Tabla 66: Rendimiento pala 7 yd ³	90
Tabla 67: Rendimiento pala 10 yd ³	91
Tabla 68: Rendimiento pala 13 yd ³	91
Tabla 69: Promedio tiempo operativo y pérdidas.	92
Tabla 70: Promedio pérdida de tiempo debido a pique lleno.	93
Tabla 71: Características de las interferencias.....	96
Tabla 72: Tiempo promedio de duración de las interferencias.	97
Tabla 73: Condición de análisis para pala 4 yd ³	98
Tabla 74: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd3.....	98
Tabla 75: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd3.....	98
Tabla 76: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd3.....	98
Tabla 77: Condición de análisis para pala 4 yd ³	99
Tabla 78: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd3.....	99
Tabla 79: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd3.....	99
Tabla 80: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd3.....	99
Tabla 81: Condición de análisis para pala 4 yd ³	100

Tabla 82: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd3.....	100
Tabla 83: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd3.....	100
Tabla 84: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd3.....	100
Tabla 85: Condición de análisis para pala 7 yd ³	101
Tabla 86: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd3.....	101
Tabla 87 Resultados diseños geométricos para LHD 7yd3.....	101
Tabla 88: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd3.....	101
Tabla 89: Condición de análisis para pala 7 yd ³	102
Tabla 90: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd ³	102
Tabla 91: Resultados diseños geométricos para LHD 7yd3.....	102
Tabla 92: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd3.....	102
Tabla 93: Condición de análisis para pala 7 yd ³	103
Tabla 94: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd ³	103
Tabla 95: Resultados diseños geométricos para LHD 7yd3.....	103
Tabla 96: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd3.....	103
Tabla 97: Condición de análisis para pala 10 yd ³	104
Tabla 98: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd3.....	104
Tabla 99: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd ³	104
Tabla 100: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd ³	104
Tabla 101: Condición de análisis para pala 10 yd ³	105
Tabla 102: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd ³	105
Tabla 103: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd ³	105
Tabla 104: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd ³	105
Tabla 105: Condición de análisis para pala 10 yd ³	106
Tabla 106: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd ³	106
Tabla 107: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd ³	106
Tabla 108: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd ³	106
Tabla 109: Condición de análisis para pala 13 yd ³	107
Tabla 110: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd3.....	107
Tabla 111: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd ³	107
Tabla 112: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd ³	107
Tabla 113: Condición de análisis para pala 13 yd ³	108
Tabla 114: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd ³	108
Tabla 115: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd ³	108
Tabla 116: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd ³	108
Tabla 117: Condición de análisis para pala 13 yd ³	109
Tabla 118: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd3.....	109
Tabla 119: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd3.....	109
Tabla 120: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd3.....	109
Tabla 121: Diseño geométrico LHD 4yd3.....	110
Tabla 122: Evaluación productividad LHD 4yd3.....	110
Tabla 123: Diseño geométrico LHD 4yd3.....	110
Tabla 124: Evaluación productividad LHD 4yd3.....	110
Tabla 125: Diseño geométrico LHD 4yd3.....	110
Tabla 126: Evaluación productividad LHD 4yd3.....	110

Tabla 127: Diseño geométrico LHD 7yd3.....	111
Tabla 128: Evaluación productividad LHD 7yd3.....	111
Tabla 129: Diseño geométrico LHD 7yd3.....	111
Tabla 130: Evaluación productividad LHD 7yd3.....	111
Tabla 131: Diseño geométrico LHD 7yd3.....	111
Tabla 132: Evaluación productividad LHD 7yd3.....	111
Tabla 133: Diseño geométrico LHD 10yd3.....	112
Tabla 134: Evaluación productividad LHD 10yd3.....	112
Tabla 135: Diseño geométrico LHD 10yd3.....	112
Tabla 136: Evaluación productividad LHD 10yd3.....	112
Tabla 137: Diseño geométrico LHD 10yd3.....	112
Tabla 138: Evaluación productividad LHD 10yd3.....	112
Tabla 139: Diseño geométrico LHD 13yd3.....	113
Tabla 140: Evaluación productividad LHD 13yd3.....	113
Tabla 141: Diseño geométrico LHD 13yd3.....	113
Tabla 142: Evaluación productividad LHD 13yd3.....	113
Tabla 143: Diseño geométrico LHD 13yd3.....	113
Tabla 144: Evaluación productividad LHD 13yd3.....	113
Tabla 145: Condición de diseño LHD 4yd3.....	114
Tabla 146: Diseños geométricos.....	114
Tabla 147: Condición de diseño LHD 4yd3.....	115
Tabla 148: Diseños geométricos.....	115
Tabla 149: Condición de diseño LHD 7yd3.....	115
Tabla 150: Diseños geométricos.....	116
Tabla 151: Condición de diseño LHD 7yd3.....	116
Tabla 152: Diseños geométricos.....	116
Tabla 153: Condición de diseño LHD 10yd3.....	117
Tabla 154: Diseños geométricos.....	117
Tabla 155: Condición de diseño LHD 10yd3.....	117
Tabla 156: Diseños geométricos.....	118
Tabla 157: Condición de diseño LHD 13yd3.....	118
Tabla 158: Diseños geométricos.....	118
Tabla 159: Condición de diseño LHD 13yd3.....	119
Tabla 160: Diseños geométricos.....	119
Tabla 161: Modelo de Producción para puntos y calles.....	131
Tabla 162: Planilla hoja cálculo de Confiabilidad de los diseños.....	133

Índice de gráficos

Gráfico 1: Curva de confiabilidad para Panzer en minería continua El salvador.....	37
Gráfico 2: Ejemplo Curvas de rendimiento de calles con LHD.....	47
Gráfico 3: Ejemplo Curvas de rendimiento efectivo de LHD's – Panzer.....	48
Gráfico 4: Ejemplo Curvas de rendimiento efectivo de LHD's – Panzer final.....	48
Gráfico 5: Rendimientos nominales de una pala LHD en función de la capacidad y distancia de acarreo.....	50
Gráfico 6: Curvas de rendimiento LHD's-Panzer, pala 4 yd ³	54
Gráfico 7: Interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd ³	55
Gráfico 8: Interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd ³	56
Gráfico 9: Interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd ³	57
Gráfico 10: Curvas de tiempo de carga y descarga para LHD de 7, 9 y 11 yd ³	88
Gráfico 11: Rendimiento nominal LHD's.....	91
Gráfico 12: Porcentaje de interferencias Zona Oeste.....	97
Gráfico 13: Porcentaje de interferencias Zona Centro.....	97
Gráfico 14: Porcentaje de interferencias Zona Este.....	97
Gráfico 15: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd ³	98
Gráfico 16: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd ³	99
Gráfico 17: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd ³	100
Gráfico 18: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd ³	101
Gráfico 19: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd ³	102
Gráfico 20: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd ³	103
Gráfico 21: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd ³	104
Gráfico 22: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd ³	105
Gráfico 23: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd ³	106
Gráfico 24: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd ³	107
Gráfico 25: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd ³	108
Gráfico 26: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd ³	109
Gráfico 27: Interacción de rendimientos.....	114
Gráfico 28: Interacción de rendimientos.....	115
Gráfico 29: Interacción de rendimientos.....	116
Gráfico 30: Interacción de rendimientos.....	116
Gráfico 31: Interacción de rendimientos.....	117
Gráfico 32: Interacción de rendimientos.....	118
Gráfico 33: Interacción de rendimientos.....	118
Gráfico 34: Interacción de rendimientos.....	119
Gráfico 35: Curva U de punto de extracción, roca primaria.....	129
Gráfico 36: Curva PCC del punto de extracción, roca primaria proveniente un benchmark.	129
Gráfico 37: Curva PCC calle de extracción, roca primaria. proveniente un benchmark.....	130
Gráfico 38: Confiabilidad vs tasa de extracción, LHD 4yd ³	134
Gráfico 39: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 7yd ³	134
Gráfico 40: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 10yd ³	135
Gráfico 41: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 13yd ³	135

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Cálculo de tiempo de ciclo para LHD.	30
Ecuación 2: Cálculo de N° de ciclos por hora para LHD (Le-feaux, 1997).	30
Ecuación 3: Cálculo de rendimiento para LHD (Le-feaux, 1997).	31
Ecuación 4: Capacidad de transporte de un Panzer.	33
Ecuación 5: Determinación del peso del carbón en un Panzer.	33
Ecuación 6: Velocidad de extracción.	37
Ecuación 7: Ecuación de diseño LHD-Panzer.	46
Ecuación 8: Fórmula para distancia media de acarreo de LHD.	49
Ecuación 9: Fórmula para cálculo de costo de operación de palas.	63
Ecuación 10: Vista en planta de cruzado.	86
Ecuación 11: Cálculo de Confiabilidad de un sistema en serie.	122
Ecuación 12: Cálculo de Confiabilidad de un sistema en paralelo.	122
Ecuación 13: Cálculo de Confiabilidad de un sistema de series paralelas.	122
Ecuación 14: Cálculo de Confiabilidad de un sistema de series de paralelos.	123
Ecuación 15: Estimación número de eventos.	124

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO DEL PROBLEMA

El arte de la minería subterránea involucra tres conjuntos de actividades:

- El desarrollo de los accesos físicos hacia la zona mineralizada;
- La extracción del macizo rocoso mineralizado; y
- El transporte del mineral hacia las instalaciones de procesamiento, ubicadas en la superficie de la mina.

El método de block caving es una forma de explotación por hundimiento (ver figura 1-1) en que el cuerpo mineralizado se derrumba naturalmente por efecto de la gravedad y de los esfuerzos locales generados, luego de haber sido socavado en su base. La propagación del caving es un efecto de la inestabilidad interna del macizo rocoso, producto de la constante extracción del mineral desde el punto de extracción hacia los puntos de vaciados (Brown, 2003).

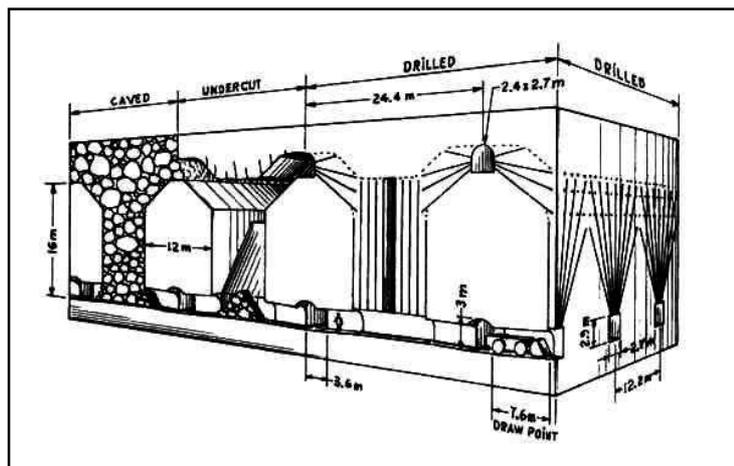


Figura 1: Esquema block caving mecanizado, Bell Mine, Canadá (Wattimena, 2003)

En el método de block caving la fragmentación del mineral, es obtenida en un menor porcentaje mediante la perforación y tronadura en relación a otros métodos de explotación. Esta se logra mediante el proceso de hundimiento, lográndose a través de un proceso mecánico natural. Esto ubica al block caving como el de menor costo de producción por tonelada (Pillar, 1981; Tobie and Julin, 1982). Adicionalmente, debido a que es un método masivo, el block caving es actualmente uno de las más importantes fuentes de producción subterránea de minerales a escala mundial (Laubscher, 1994; Wattimena, 2003).

En la mayoría de las operaciones actuales, desarrollado mediante el método de block caving, el mineral fragmentado es removido desde el punto de extracción por un vehículo LHD (Load-Haul-Dump), aunque algunas siguen usando sistemas más tradicionales como traspaso gravitacional mediante parrillas o palas de arrastre (scraper) (Wattimena, 2003).

La elección de un sistema de manejo de minerales depende en gran medida de la predicción de fragmentación o granulometría del material esperado (Carter C and Russell F, 2000). Esta elección determinará tanto el diseño del nivel de producción como el de transporte, restringido por parámetros geomecánicos.

Dentro de las operaciones mineras, la actividad de manejo y gestión de minerales es una de los más incidentes en el costo de operación general, principalmente por la gran cantidad y variabilidad de recursos involucrados en ella. Por lo que gran parte de las innovaciones tecnológicas apuntan a esta actividad, tanto por la importancia de ella en costo de operación como en la cantidad de etapas involucradas (Le-feaux, 1997).

Los sistemas tradicionales de manejo de materiales para mineral grueso con palas LHD, piques de traspaso y trenes o camiones, han alcanzado velocidades bajas de extracción en el orden de 0,5 (t/m²d) (Flores, Karzulovic 2004). Esta limitación se produce, en parte, por la productividad por turno que se puede alcanzar con las palas

LHD. Para mejorar la rentabilidad del negocio minero, se hace necesario mejorar los parámetros de rendimiento de palas LHD y la velocidad de extracción. Para lograr estos objetivos, se han incorporado nuevas tecnologías tales como equipos LHD de mayor tamaño y capacidad, hasta alcanzar las 13 yd³, y también incorporando sistemas de telecomando, pero ninguno de estas dos opciones ha demostrado mejoras sustanciales (Arancibia E., 2009).

La existencia de equipos transportadores tales como el Panzer o Transportador de Cadenas o Armored Face Conveyor (en inglés), ampliamente utilizado y conocido en la minería del carbón, abre una posibilidad para el manejo continuo de materiales de fragmentación gruesa en el contexto de la minería metálica (Carrasco, 2002). Durante los años 2007-2008, Codelco ha realizado pruebas de la minería continua con este equipo transportando minerales de gran granulometría (hasta 2,3 m de diámetro) y mucha abrasividad y dureza como la roca primaria en El Salvador (Inca Oeste). Es así como se plantea una solución de manejo de minerales intermedia entre el tradicional y el continuo. La idea principal es incorporar este equipo no convencional en la minería de Block Caving con la finalidad de disminuir las distancias de acarreo de las palas LHD y asignarle esa tarea a los equipos Panzer.

Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo establecer una metodología de diseño y evaluar la productividad alcanzable de un sistema de manejo de minerales compuestas por palas LHD, pique de traspaso y Panzer.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Un adecuado diseño del nivel de producción y de transporte, junto con un eficiente sistema de carguío y transporte de minerales, es de suma importancia para el éxito de un proyecto minero de block caving. Sin una producción de mineral en

cantidades sustanciales, un proyecto minero puede incluso fracasar (Hartman H., Mutmanky J., 2002).

El método de block caving, en su forma tradicional –con chutes, parrillas, y transferencia gravitacional hacia un nivel de transporte- ha logrado a través de los años, un alto grado de estandarización y eficiencia. Un diseño similar fue adoptado por la mina Río Blanco de Andina, pero con un nivel intermedio de transporte con correas; mientras que en El Salvador, a causa de la geometría del cuerpo mineralizado, se optó por usar *scrapers* para la extracción del mineral. Sin embargo, la aparición de sectores con roca de mayor competencia y la aparición de una fragmentación cada vez más gruesa, en los programas de producción, generó una disminución en la productividad empleando diseños tradicionales de block caving (J. Chacón et al, 2004).

Factores como la profundización de los yacimientos, la aparición de rocas más competentes y por ende con una fragmentación más gruesa, la disminución de la ley del mineral (ej. Pórfidos de cobre en profundidad) y un aumento progresivo de los costos asociado a la extracción del mineral, han gatillado la necesidad de estudiar alternativas que permitan aumentar la productividad del sistema, con el fin de mantener o mejorar la rentabilidad del negocio minero. Y en este sentido, la evolución del sistema de manejo de materiales en la minería subterránea ha sido adoptada para manejar la presión asociada a los equipos capaces de manejar granulometría más gruesa. (Chacón, 1976, 1980), (Chacón et al, 2004).

Mediante la experiencia de la minería del carbón y pruebas realizadas por Codelco y el *Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia S.A. (IM2)*, se reconoce que el equipo transportador de cadenas es bastante robusto con un alto potencial a ser utilizado en una minería en que el material a tratar es bastante hostil con el desgaste de los elementos del equipo. El principal aporte del Panzer sería la capacidad de transportar en forma continua y a bajo costo materiales de mayor tamaño, antes del

chancado primario. Por tal motivo, existe un gran interés por estudiar la forma de relacionar y evaluar la productividad estimada de un sistema de carguío y transporte, donde involucren un conjunto recursos discretos de carguío (LHD) y un equipo continuo de transporte (Panzer).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Proponer una metodología para diseñar un sistema de manejo de minerales compuesta por LHD y Panzer, y hacer una evaluación de la productividad del equipo LHD y de la velocidad de extracción alcanzable.

El estudio no considerará el chancado primario ni el nivel de transporte (camiones, trenes o correas) pues se supone que debiera ser independiente para todas las configuraciones.

1.3.2 Objetivos Específicos

Las tareas específicas que se pretende desarrollar con este trabajo son las siguientes:

1. Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte del sistema de manejo de materiales utilizados actualmente en la minería block-panel caving mecanizado;
2. Generar diseños para un sistema de manejo de minerales compuesto por LHD's y Panzer, para estimar rendimiento de palas LHD y evaluar, mediante un proceso determinístico, la productividad en régimen (t/m²/día) de las distintas alternativas generadas para el sistema LHD-Panzer propuesto, y así seleccionar aquellos que maximicen los parámetros productivos mencionados;
3. Realizar un análisis de sensibilidad de los índices productivos de las palas y del área hundida en función de algunos parámetros operacionales tales como la utilización de los equipos LHD, disponibilidad de los equipos alimentadores

y Panzer para ver la variabilidad de los diseños y seleccionar aquellas condiciones de operación que maximizan la productividad y minimizan costo de operación.

1.4 ALCANCES

La definición clara del alcance del trabajo permite la abstracción del problema en ciertas condiciones y/o suposiciones, que de una u otra forma permitirá facilitar el desarrollo del trabajo y el cumplimiento de los objetivos planteados. Por tales razones, los alcances considerados para este trabajo son los siguientes:

- Se engloba en la minería de hundimiento por bloques o paneles bajo la malla tipo Teniente, pero también es aplicable a otras mallas puesto que no se hace variación en el diseño de malla;
- Se analiza desde el nivel de extracción, mediante LHD hasta el nivel de acarreo con Panzer, incluyendo este último. No se considera el chancado primario ni el manejo de minerales agua abajo; y
- No está dentro del alcance la evaluación económica de la preparación ni de la inversión de los diseños. Solo se calculará a grueso modo el costo de operación desde el nivel de extracción hasta el nivel de acarreo mediante el sistema propuesto.
- Por tratarse de un trabajo de ingeniería de perfil, para las palas LHD se consideran los costos de operación más relevantes tales como consumo de combustible, neumáticos, mantención y reparación, sin contar con la mano de obra. Los datos de costos se obtuvieron mediante benchmarking de otras faenas de similares características, por lo que podrían variar. Los costos de operación estimada corresponden al de un módulo, el cual está caracterizado

por contar un número de recursos determinados que operan en conjunto para lograr una producción máxima esperada.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para lograr los objetivos específicos planteados anteriormente, se propone la siguiente metodología de trabajo:

1. Contextualizar el tema a desarrollar mediante una revisión bibliográfica del estado del arte del sistema de manejo de minerales usados en la actualidad en las minas subterráneas de block caving, y de algunos factores importantes que inciden en el diseño de éstos;
2. Se trabaja para capacidades de LHD de 4, 7, 10 y 13 yd³, y se supondrá que hay una granulometría del mineral adecuada para cada pala y se supondrá que opera un solo LHD por calle de producción;
3. Si bien en este trabajo no trata el diseño de piques de traspaso, se consideran piques cortos de aproximadamente 10 (m) con un diámetro entre 3 a 3,5 (m), suponiendo que se trata de granulometría gruesa;
4. Se emplean algunos parámetros operacionales de benchmarking y por lo tanto no se basa en una faena específicamente particular;
5. En este trabajo se consideran un pique de traspaso por calle de producción y de longitudes cortas de 10 (m). Se supone que por ser piques cortos, las fallas y los costos de mantención serán menores. Para materiales primarios de granulometría gruesa se usarán piques de 3 (m) de diámetros;
6. Proponer y evaluar cualitativamente diferentes alternativas de configuración del equipo Panzer con las calles de extracción (diseños), con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa a ser desarrollada en el trabajo;

7. Desarrollar una metodología que permita cuantificar los diseños propuestos para distintas configuraciones LHD-Panzer, permitiendo determinar para cada caso:
 - a) El número de calles de extracción relacionadas a un Panzer;
 - b) El largo de las acalles de extracción; y
 - c) El largo del equipo Panzer.

La condición a cumplir es que la productividad diaria del nivel de extracción sea igual a la del nivel de acarreo;

8. Para cada diseño obtenido, estimar el rendimiento de palas LHD y la velocidad de extracción en t/m^2d , para luego seleccionar aquellos que logran satisfacer los parámetros productivos;
9. Hacer un análisis de sensibilidad de la productividad de las palas LHD y de la tasa de extracción en función de la utilización esperada de los equipos LHD en el nivel de extracción. Para ello se mantendrán fijos las disponibilidades físicas de los equipos feeder y Panzer. También se hará una selección de los diseños que maximicen los parámetros establecidos;
10. Concluir con respecto al trabajo realizado y establecer recomendaciones para trabajos futuros; y
11. Aplicar la herramienta de la teoría de confiabilidad de diseño minero para estimar la probabilidad de cumplir con la producción.

1.6 CONTENIDO POR CAPÍTULO

Se resume el contenido de cada capítulo a modo de dar a entender la estructura de este trabajo para su mejor comprensión:

Capítulo 2: Se realiza una revisión del estado del arte de los sistemas de carguío y transporte que se emplean actualmente en las principales minas de block

caving, mencionando algunos puntos más relevantes como los distintos componentes de infraestructura minera, capacidad y configuración de los equipos involucrados, productividades, flowsheet del proceso de manejo de minerales, entre otros.

- Capítulo 3: Se hace una revisión bibliográfica de la clasificación y características de algunos equipos usados en el sistema de manejo de minerales, principalmente aquellos que configuran el sistema a estudiar. También, revisar los factores que influyen en el diseño de un sistema de carguío y transporte de minerales;
- Capítulo 4: En este capítulo se selecciona la configuración LHD-Panzer. Bajo esta configuración se propone una metodología para generar opciones geométricas de diseños con la condición de igualdad de productividad del nivel de extracción y de acarreo. Se evalúan los diseños mediante parámetros productivos como son el rendimiento de las palas LHD y la velocidad de extracción del módulo;
- Capítulo 5: Se analizan cómo varían la productividad en función de la utilización del equipo LHD en las calles de extracción. También se evalúa el costo de operación desde que el mineral se extrajo del punto de extracción hasta el acarreo del Panzer.
- Capítulo 6: Se realizan conclusiones finales acerca del trabajo, con recomendaciones para trabajos futuros.

En el capítulo de anexo se aplica la teoría de confiabilidad a los diseños finales propuestos, obteniéndose los respectivos resultados y conclusiones.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN LA MINERÍA DE BLOCK CAVING

2.1 INTRODUCCIÓN

Los diseños actuales de sistema de carguío y transporte en minería de block caving son el resultado de un proceso continuo de acumulación de experiencia y conocimientos operacionales, junto con el desarrollo y avance tecnológico de los equipos mineros.

Los sistemas de manejo de minerales están compuestos por diversos equipos e infraestructura que permiten manipular el material con diversas capacidades. Éstos estarán determinados por dos factores principales.

- Parámetros de diseño del sistema de carguío y transporte; y
- Características del tipo de material a tratar.

La segunda característica, es una condición de borde, porque depende de las propiedades del macizo rocoso. En este caso es muy importante contar con una aproximación de la granulometría esperada del mineral en el punto de extracción. Así como también, de frecuencia de eventos de colgadura y sobretamaño que podrían impedir un trabajo fluido en las operaciones de carguío y transporte de minerales.

En la medida en que las minas de block caving han profundizado y explotado minerales primarios, de mayor granulometría, se ha optado por el uso de equipos cargadores LHD de mayor tamaño para extraer el mineral desde los puntos de extracción (Wattimena 2003). A modo de ejemplo se puede ver la siguiente tabla donde

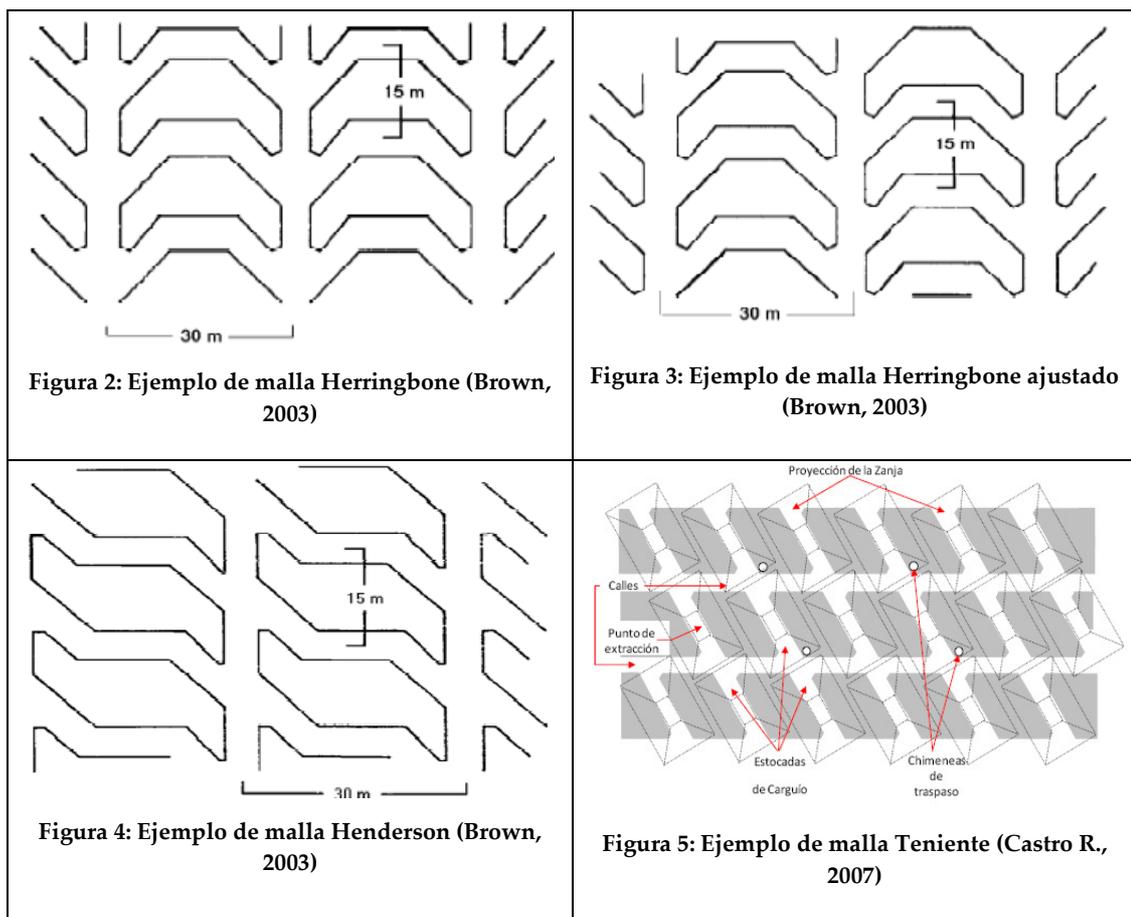
se muestran distintos tipos y capacidades productivas para distintas faenas en el mundo.

Mina	País	Layout	Producción (Mt)	Producto
El Teniente	Chile	LHD/parrillas	54	Cobre
El Salvador	Chile	LHD	10	Cobre
Andina	Chile	LHD/parrillas	16	Cobre
Henderson	EE.UU.	LHD	5,4	Molibdeno
Bell	Canada	LHD	0,9	Asbestos
Premier	Sudáfrica	LHD	3	Diamante
Shabanie	Zimbawe	LHD	1,3	Cobre
Philex	Filipinas	LHD/parrillas	10	Cobre
Lutopan	Filipinas	Parrillas	9,4	Cobre
Freeport	Indonesia	LHD	18	Cobre/oro
Northparkes	Australia	LHD	3,9	Cobre/oro

Tabla 1: Sistema de producción en minas explotadas mediante block caving (Rubio, 2006).

2.2 SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN LA ACTUALIDAD

Si bien el alcance de este trabajo está sujeto para un sistema de carguío y transporte para diseño de malla tipo Teniente, es importante tener en cuenta que existen otros tipos de diseños. Laubscher (2000) ha identificado 10 diseños diferentes para LHD, siendo los más conocidos, además del Tipo Teniente, la malla tipo Herringbone, malla tipo Offset Herringbone y malla tipo Henderson o Z layout. Éstos se muestran en las siguientes figuras.



En este capítulo del trabajo se pretende hacer una revisión del estado del arte de algunos de los sistemas de carguío y transporte empleados actualmente en minas de block caving mecanizado mediante LHD, independiente del tipo de malla, con la finalidad de entender el contexto global del tema a desarrollar en este trabajo.

2.2.1 Mina Henderson

Es una mina de molibdeno, con una malla tipo teniente de 17 x 31 (m). El nivel de producción posee dimensiones de 540 x 390 (m) con alturas de columnas que varían entre 122 y 340 (m) y posee una producción media de 32.000 TPD (toneladas por días). El sistema de carguío y transporte está compuesto por los siguientes componentes:

- LHD de 8,7 (yd³);
- Piques de traspaso con diámetro de 2,1 (m);

- Camiones de bajo perfil de 72 toneladas;
- Correa transportadora de 24 (km), aprox.

El mineral cargado por el LHD, proveniente de los puntos de extracción, es descargado sobre piques de traspaso. El espaciamiento entre piques está entre 102 a 130 (m), dependiendo del largo total de la galería de producción, altura columna mineral, tonelaje y el correspondiente diseño silo y buzón. Dos piques se conectan mediante un silo, que descarga a través de un buzón sobre la tolva del camión, ubicado a 44 (m) bajo el nivel de producción. Los camiones transportan el mineral hasta el chancador primario en el interior de la mina. Luego el mineral, reducido de tamaño, es transportado nuevamente mediante correas transportadoras hasta la planta de molienda, (Callahan, Keskimaki, Fronapfel, 2008). En la siguiente figura es posible visualizar de manera general el sistema mencionado anteriormente.

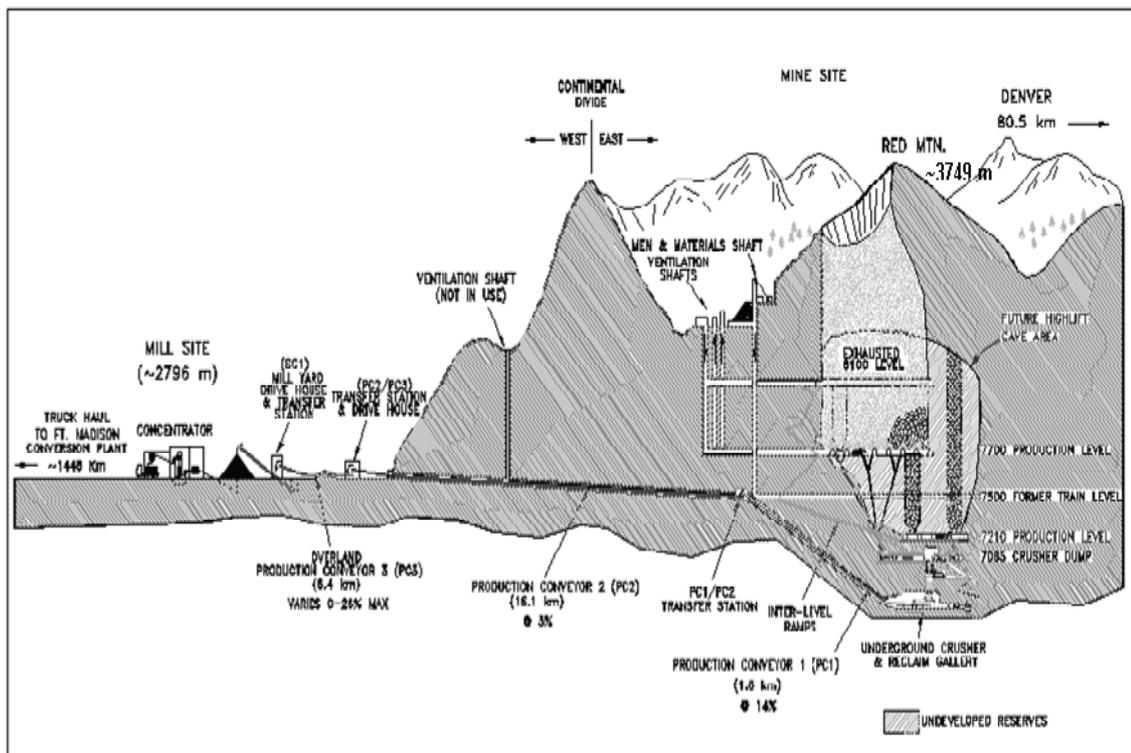


Figura 6: Sección general, Mina Henderson (Callahan et al, 2008).

2.2.2 *Mina Northparkes E26 Lift2*

Es una mina de cobre/oro, con una malla tipo Offset Herringbone de 18 x 15 (m). La filosofía usada para el diseño del sistema de manejo de minerales es la siguiente (Duffield, 2000):

- Minimizar la cantidad de manejo de minerales;
- Minimizar las etapas en reducción de tamaño de bloque de mineral;
- Tamaño del chancador para manejo de tamaño roca máxima que el LHD podrá llevar;
- Instalar un sistema continuo (el concepto de "Rock Factory").

Los componentes del sistema de carguío y transporte son:

- Flota de 6 equipos LHD eléctricos, con capacidad de balde de 7,8 (yd³);
- Correa transportadora;
- Skip, para la extracción del mineral a superficie.

Se mantuvo el sistema utilizado en E26 Lift1, compuesta por equipos LHD que vacían directamente sobre el chancador, situado en el nivel de extracción o producción. El largo promedio de la calle de extracción es de 266 (m), con un promedio de distancia de acarreo de 150 (m). El mineral fragmentado es transportado por una correa, para luego llevar a superficie mediante skip. El diseño del sistema de carguío y transporte fue realizado considerando los criterios de productividad, minimización del costo de operación y el de capital (Ross, 2008).

Bajo el tercer criterio, se optó no usar piques de traspaso de mineral y usar infraestructura y servicios existentes de la mina anterior (Lift1) como se aprecia en la Figura 7.

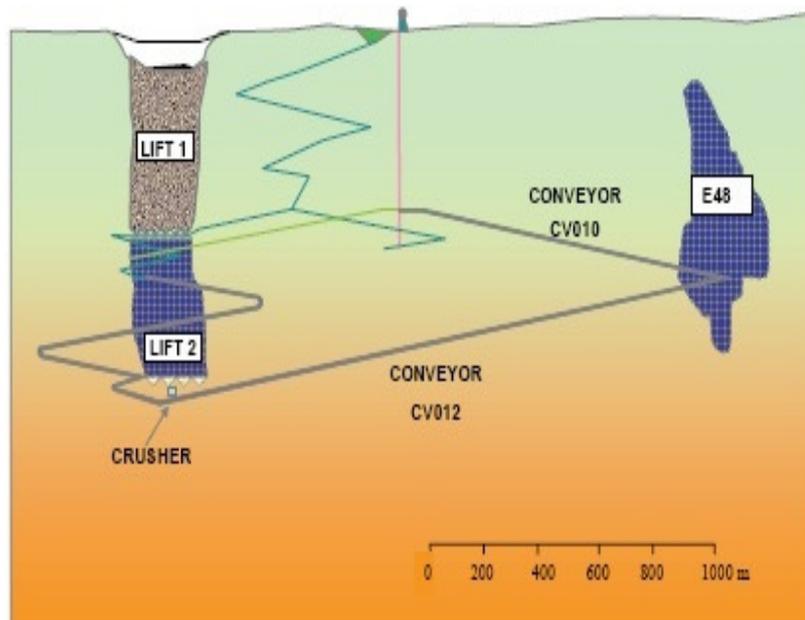


Figura 7: Perfil del sistema de manejo de minerales en mina Northparkes.

2.2.3 Mina Palabora Subterránea

Posee un diseño de malla tipo Herringbone Offset, con dimensiones de 17 x 34 (m), con dimensiones del footprint de 650 (m) de largo y 200 (m) de ancho, con 20 cruzados de producción y 320 puntos de extracción, lo que le permite un ritmo de producción de 30.000 tpd de mineral.

La fragmentación del mineral en los puntos de extracción es gruesa, por lo que implica una alta actividad de reducción secundaria para tratar eventos de colgaduras y sobre tamaños. Los componentes del sistema de carguío y transporte son las siguientes:

- Flota de 11 equipos LHD, tipo diesel, con capacidad de balde de 8,5 (yd³);
- Correa transportadora, de capacidad 2.000 (tph);
- Skip.

Los equipos LHD alimentan a 4 chancadores de mandíbula, ubicadas en la zona norte del footprint (Figura 8). El mineral reducido de tamaño pasa a una correa, la cual transporta hasta un silo, para luego ser llevado a superficie mediante skip. El punto de

extracción se descuelga mediante perforación y tronadura con emulsión, mientras que el sobre tamaño, mediante técnicas no explosiva de reducción de tamaño.

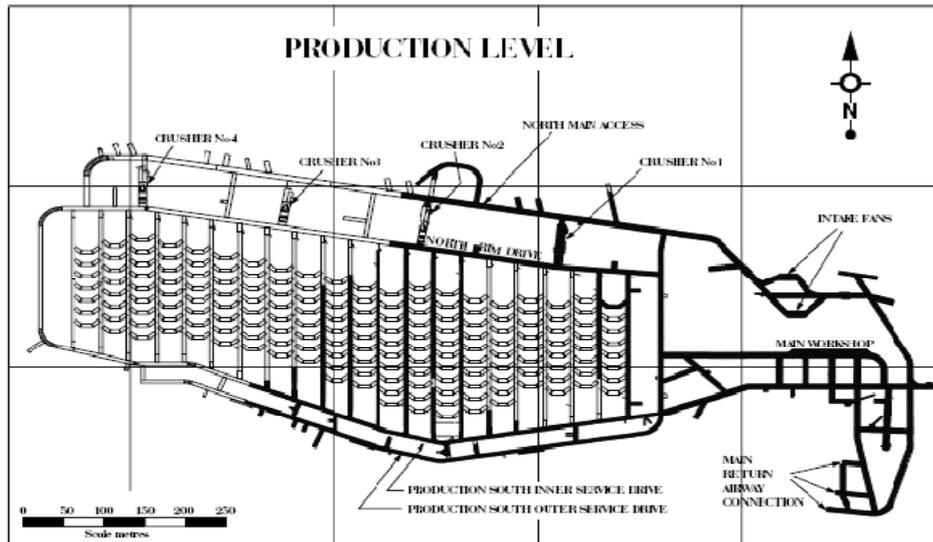


Figura 8: Vista en planta del nivel de producción de la mina Palabora.

2.2.4 Mina Premier

Es una mina de diamante, de fragmentación gruesa, que utiliza el método de explotación block caving mecanizado con LHD, a partir de 1970. Posee un diseño de tipo Herringbone Offset.

Este yacimiento fue dividido en 2 zonas de acuerdo al RMR, nombrándose BA5 y BB1E. El primero posee dimensión de malla de 15 x 15 (m), mientras que el otro es de 15 x 18 (m).

Los componentes del sistema de carguío y transporte son:

- Equipos LHD, de tipo diesel y eléctricos, de capacidad 5 y 7 (yd³) respectivamente;
- Camiones de bajo perfil.

El mineral proveniente de los puntos de extracción es cargado por el equipo LHD, para luego ser descargado sobre la tolva de un camión de bajo perfil. Este último

transporta el material hasta un chancador primario. La productividad del equipo LHD, en promedio, está en torno a los 125 tph, con una distancia media de acarreo de 144 (m).

2.2.5 Mina El Teniente

2.2.5.1 Sector Mina Pipa Norte:

Mina Pipa Norte está ubicada en el extremo Noroeste del yacimiento El Teniente. En relación a otros sectores de la mina, Pipa Norte se encuentra al Sur del sector T6 Quebrada Teniente. Sus reservas extraíbles en PND 2008 corresponden 12,2 Mt con una ley media de 0,96 % de CuT y 0,019% de Molibdeno. Para el año 2008 la producción comprometida es de 9.256 t/d, para luego aumentar los años 2009 y 2010 a 10.000 t/d y finalizar su producción con 4.300 (t/d) el año 2011.

El método de explotación es el Panel Caving, tipo Hundimiento Avanzado al Límite. El manejo de materiales ha incorporado nuevas tecnologías, respecto de los sectores tradicionales. En este caso se operan equipos LHD semiautomáticos de 13 yd³ que descargan a un buzón con parrilla y martillo picador que alimenta de mineral mediante Plate Feeder a un chancador de mandíbula. Luego a través de correas transportadoras de 48", el mineral es enviado al pique OP-17 Hw, para ser posteriormente transportado a Planta Colón por medio del FFCC Ten 8. La Figura 2-8 refleja el flujo del movimiento de material productivo del Sector Mina Pipa Norte.

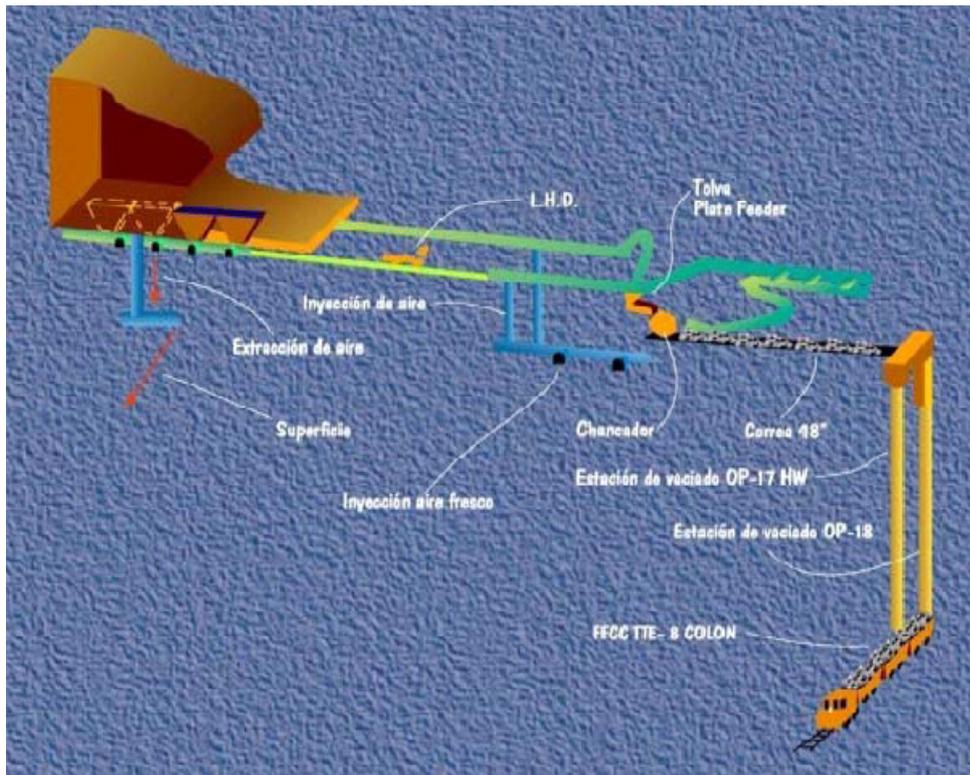


Figura 9: Esquema isométrico del sistema manejo minerales de Mina Pipa Norte.

2.2.5.2 Sector Mina Reservas Norte:

Mina Reservas Norte se ubica al Norte del yacimiento El Teniente y corresponde a una extensión de Teniente Sub-6 al Norte desde el Área Invariante. Este sector, limita al Sur con el sector Pilar Norte y al Oeste con el sector Dacita. Dentro del plan del PND 2008 las reservas extraíbles corresponden a 147,5 Mt con una ley media de 1,09 %CuT y 0,023 % de Molibdeno. Para el año 2008 se espera una producción de 27.635 (t/d), alcanzando su máximo de 37.500 (t/d) en el año 2014. Posteriormente el ritmo decrece hasta agotar las reservas en el año 2022 con 5.000 (t/d).

En el nivel de producción del área Andesita operan Palas LHD de 7 yd³ que transportan y vacían el mineral en piques de traspaso de aproximadamente 30 (m). El sistema de manejo de materiales (ver Figura 10) se caracteriza por el uso de alimentadores estacionarios Plate Feeder ubicados en el Nivel de Acarreo los cuales cargan a camiones de 80 toneladas, de ahí el mineral pasa al sistema de traspaso principal compuesto por 4

piques tolvas de 5 m de diámetro y 71 m de longitud, emplazados en la formación Braden, que permiten transferir el mineral hasta el Nivel de Transporte Principal Teniente 8. Los piques tolva tienen incorporado un sistema de clasificación compuesto por una parrilla de 40" x 40" y un martillo picador, produciéndose la reducción de mineral requerida por la planta de Chancado Primario de Colón y el ferrocarril Teniente 8 que opera con carros de 80 ton.

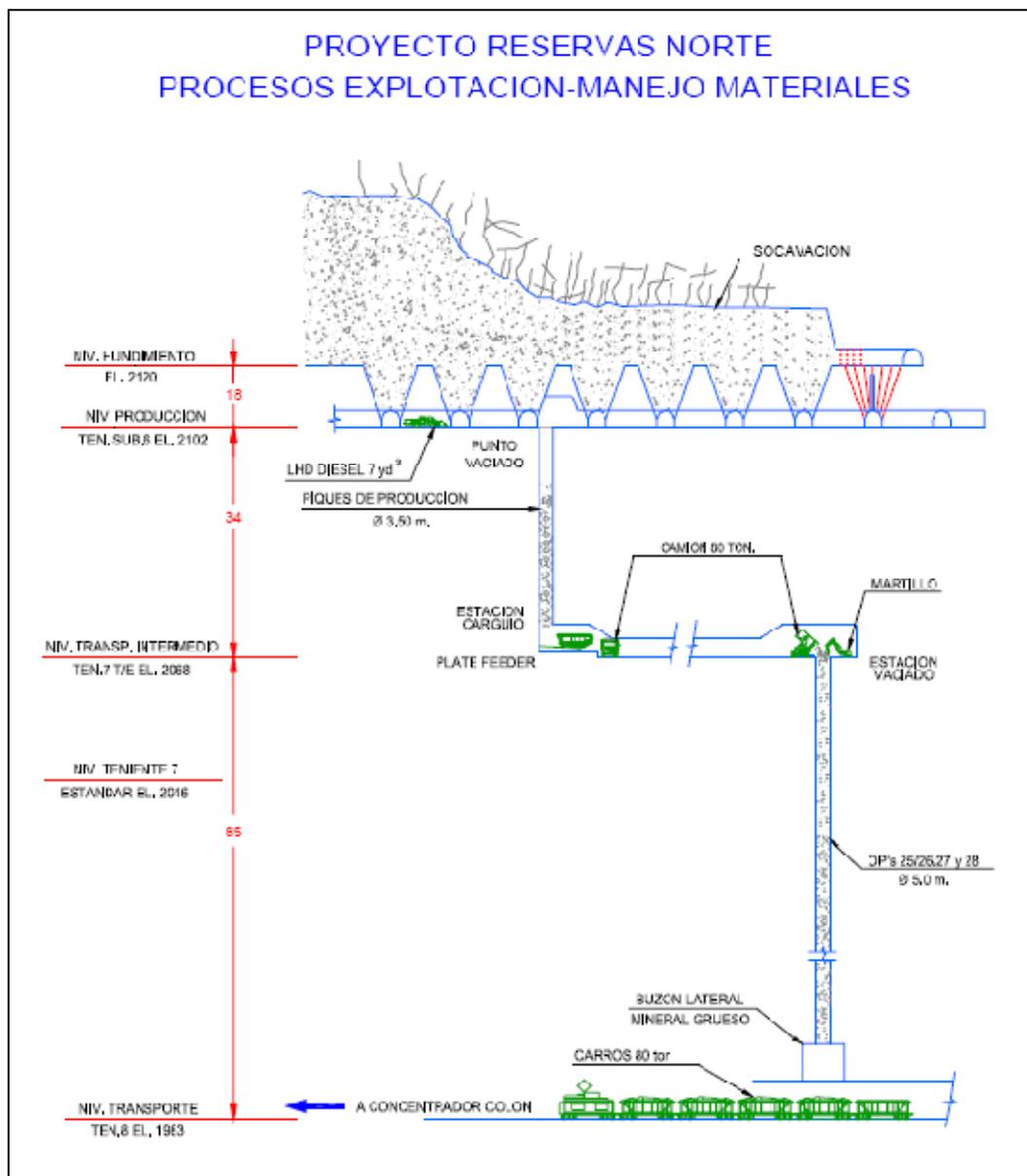


Figura 10: Perfil del sistema de manejo de minerales de Reservas Norte.

2.2.5.3 Sector Mina Esmeralda:

Mina Esmeralda se ubica al este del yacimiento, bajo el área de producción agotada del sector Teniente 4. Las reservas extraíbles en el PND 2008 corresponden a 294 (Mt) con una ley Media de 0,98% CuT y 0,023% de Molibdeno. En el año 2008 se estima una producción de 35.000 (t/d), alcanzando su régimen entre los años 2012 y 2024 con una producción de 45.000 (t/d), posteriormente su ritmo comienza a decrecer llegando el año 2026 con 25.000 (t/d) (año de cierre).

El método de explotación es Panel Caving con variantes de hundimiento avanzado, convencional y forzamiento. El nivel de producción cuenta con una malla de extracción de 17 x 17 (m), donde la distancia media de transporte asciende a 60 (m). El mineral es extraído desde las zanjias por palas LHD de 7 yd³, y apoyado por martillos picadores en el nivel de producción, vacían a piques de traspaso intermedios que cargan en el nivel de transporte al FFCC Teniente 6 Esmeralda que acarrea el mineral hasta las tolvas de los OP's 22, 23 y 24 que alimentan en el nivel de transporte principal, al FFCC Teniente 8 que lleva el material a la Planta Colón. En la figura siguiente se muestra, en forma simplificada, el sistema de carguío y transporte de la Mina Esmeralda.

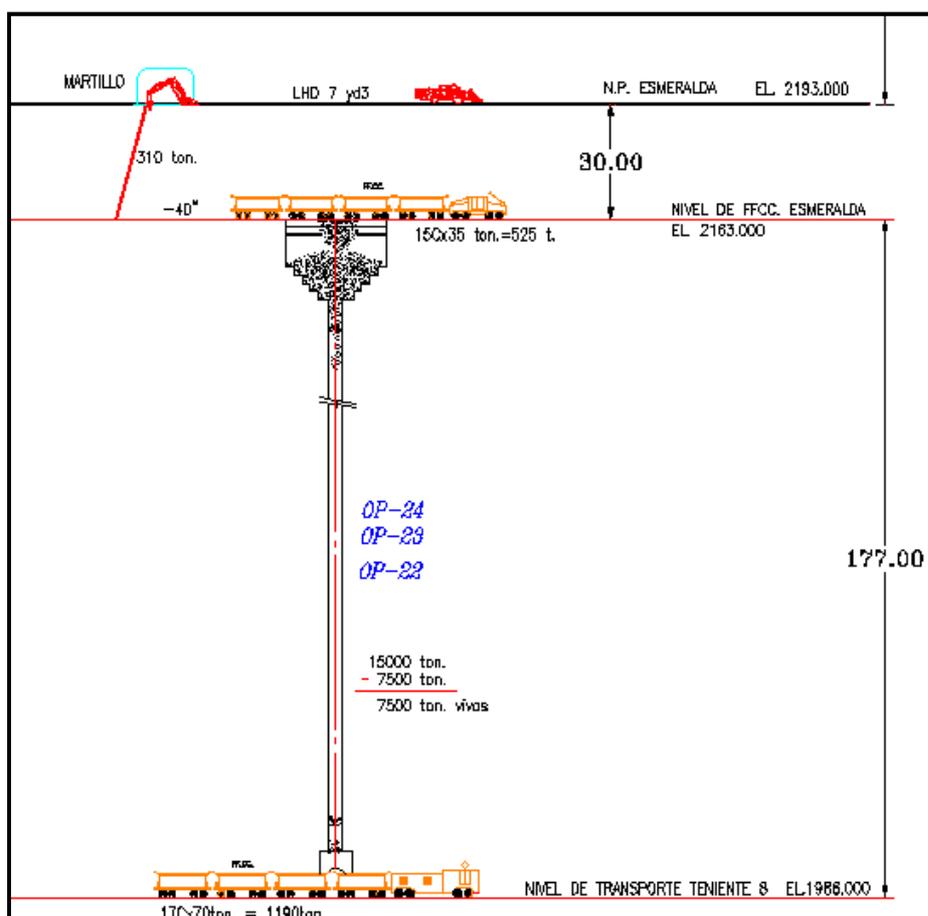


Figura 11: Esquema sistema carguío y transporte Mina Esmeralda.

2.2.5.4 Mina El Salvador

Es una mina subterránea compuesta por minerales primario, secundario y mixto. Se explotada mediante el método de Panel Caving con un diseño de malla de extracción actual de tipo Teniente de 15 x 15 (m x m) para el primario y de 13 x 13 (m x m) para el mixto. Las labores de extracción de mineral es realizada por palas LHD de 6 y 7yd3, para luego vaciar sobre un pique corto de aproximadamente de 12 (m) de largo y 2,5 (m) de diámetro. Una parrilla de 34" x 64" es la encargada de clasificar el tamaño de ingreso del mineral al pique. Luego, hay un subnivel de reducción mediante martillo picador con parrilla de 12", pero éste fue reemplazado, en 1998, por un chancador de mandíbula que permitió mejorar la tasa de extracción de 0,12 a 0,28 (t/m²d) (Nicola R. y Fishwick M., 2000). La tasa media de extracción es de 0,5 (t/m²d). El mineral continúa su camino a

través de un pique hasta llegar a una tolva. Finalmente el mineral es transportado mediante un ferrocarril en el nivel transporte. A continuación se muestra el perfil del sistema de manejo de minerales utilizado por El Salvador.

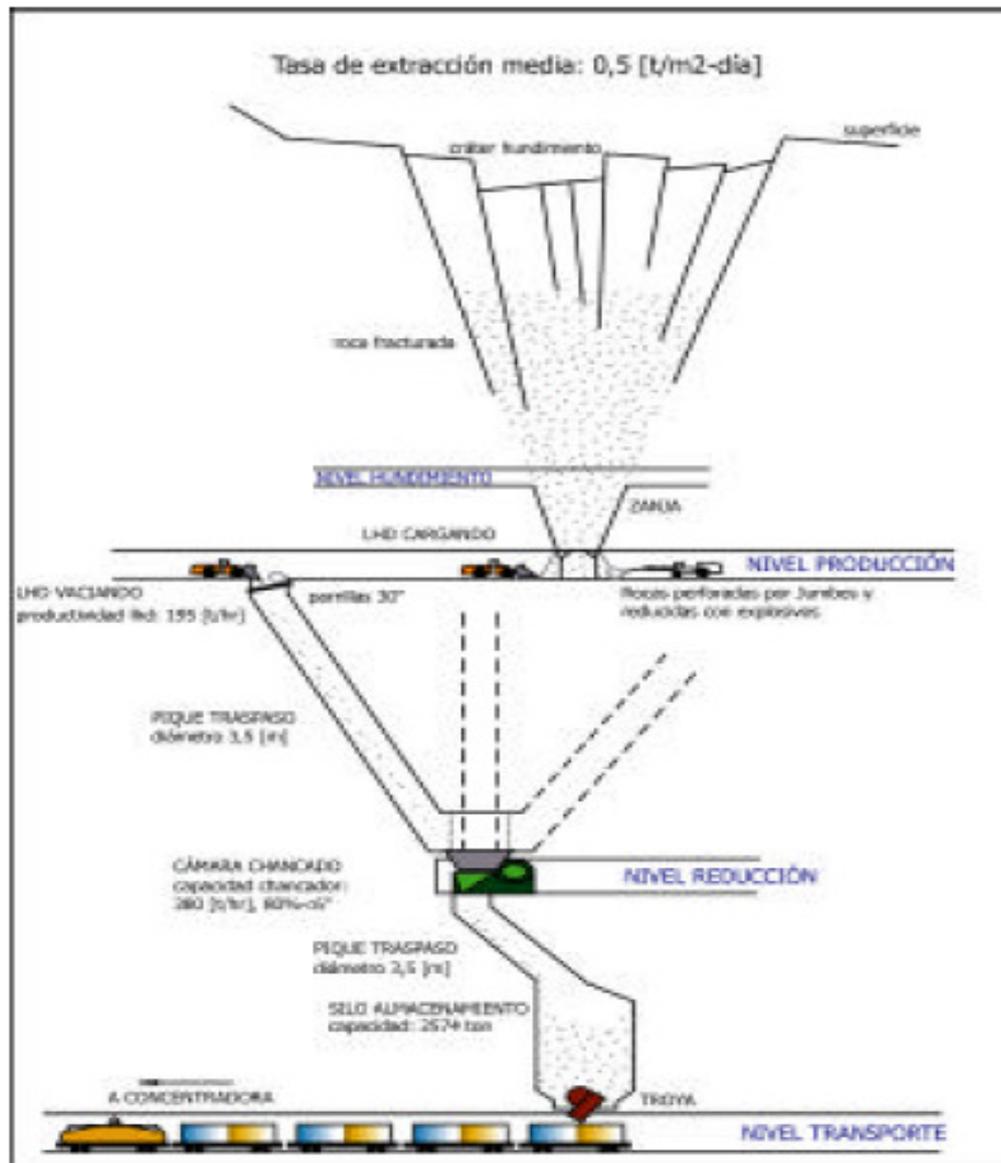


Figura 12: Vista perfil del sistema de manejo de minerales de El Salvador.

2.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Para los diseños de sistema de manejo de minerales es indispensable contar previamente con información de la estimación de la curva granulométrica esperada en

los puntos de extracción y de las características del material a tratar. Esto ayudará a seleccionar equipos adecuados para las labores de carguío y transporte de mineral.

No existe faena minera que tenga un sistema de carguío y transporte idéntico a otra. Esto es debido a que el sistema escogido responde a criterios particulares de cada mina, como la geometría del yacimiento mineralizado, el tipo y calidad del macizo rocoso, la profundización de las labores, cantidad de material a extraer, criterio de costos, entre otros.

La mayoría de los casos revisados, utilizan un sistema de acarreo de minerales discreto mediante camiones de bajo perfil, trenes o por el mismo LHD que acarrear el mineral distancias largas hasta un chancador o hasta el punto de vaciado para camiones, mermando el rendimiento de estos equipos.

La correa transportadora es una alternativa para transportar minerales de forma continua, pero requiere de un chancador previo debido a la restricción sobre el tamaño máximo tratable

El uso de la energía de la gravedad juega un rol muy importante en el manejo de minerales en el block caving. Con respecto a la revisión bibliográfica realizada, la mayoría de las minas emplean este sistema de transporte mediante piques para separar labores como la extracción, acarreo, reducción y transporte. Pero, hay que tener en cuenta que mientras más se profundice, mayor será el costo de llevar el mineral a superficie, siempre y cuando la salida no esté en una cota cercana al nivel de transporte principal (ejemplo El Teniente).

En cuanto a la productividad, la velocidad de extracción se encuentra en torno a 0,5 (t/m²d).

CAPÍTULO 3

FACTORES QUE INCIDEN EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES Y ESTADO DEL ARTE DE LOS EQUIPOS LHD Y PANZER

3.1 INTRODUCCIÓN

En un block caving, tres de los elementos cruciales del sistema de extracción son el nivel de hundimiento, el embudo o batea, y el nivel de extracción (Bullock R., Hustrulid W., 2001). El grado de fragmentación que se presenta como bloques de roca en la cima de la batea son las bases para el diseño y rendimiento del sistema. En los tiempos en que nació el método block caving, los materiales eran blandos y hundían fácilmente. Hoy en día la tendencia es usar la minería de hundimiento en minerales más duros y competentes, por consiguiente con mayores desafíos en el tema de manejos de minerales debido al aumento en la granulometría y las limitaciones tecnológicas existentes.

Asumiendo el uso de equipos LHD, los mayores desarrollos en el nivel de extracción consisten de galerías de extracción o calles de producción, puntos de extracción, estocadas de carguío y bateas. El “diseño” es un proceso iterativo (Bullock R., Hustrulid W., 2001). La granulometría del material a ser manejado es el punto de partida para definir el diseño geométrico y la elección de los equipos necesarios para el manejo del material. El tamaño físico de los equipos de carguío, está relacionado a su vez con los requerimientos de la capacidad de la pala, el cual está relacionado con el tamaño del material a manipular. Por ejemplo, si se espera una fragmentación gruesa, es necesario un tamaño de balde mayor y por ende equipos de mayores dimensiones. Conociendo el tamaño del equipo a usar, se puede llegar a determinar la sección de las

galerías, el que también estará restringido por las características geotécnicas del sector. A su vez la distancia entre puntos de extracción determina la recuperación del sector.

En este capítulo se revisará algunos factores importantes que inciden en el manejo de materiales en el block caving, la clasificación y características operativas de los equipos a usar, de manera que sirvan de base en el diseño del nuevo sistema de manejo de minerales propuesto en este trabajo.

3.2 FACTORES QUE INCIDEN EN LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES

Una vez que se define la geometría del yacimiento a explotar, las principales variables condicionantes para determinar los parámetros de diseño de un block caving es el conjunto de propiedades geomecánicas del macizo rocoso en cuestión (J. Chacón et al, 2004). Estos parámetros intervienen de forma tal que individualmente o en conjunto entregan la información necesaria para prever comportamientos, inferir resultados y definir diseños. Dependiendo del origen de cada uno de ellos se pueden clasificar básicamente en dos grupos:

- *Característica de la roca in-situ*: este conjunto de características propias del yacimiento son incontrolables en cuanto a su ocurrencia y solo se pueden cuantificar y considerarlas en un análisis para el aprovechamiento de esta información.
- *Característica geométricas o de diseño*: se encuentran aquellos parámetros que son de potestad exclusiva del ingeniero o diseñador, cuestión implícita que determina alteración o cambio a voluntad de cada uno de ellos, sin perder de vista que los parámetros de la roca acotarán los parámetros geométricos, imponiendo así restricciones a los diseños.

Los parámetros de ambos grupos se pueden resumir en la siguiente tabla:

Parámetros de la roca in situ	Parámetros geométricos
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo roca; • Ley de mineral; • Estructuras; • Presencia de fracturas; • Presencia de agua; • Alteración; • Resistencia mecánica; • Altura de columna; • Presencia y ubicación de estéril. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de los equipos; • Malla de tiraje; • Área de pilares; • Altura de pilares; • Área excavada; • Ángulo y longitud de estocadas de carguío; • Tipo de corte inicial; • Medios de extracción.

Tabla 2: Parámetros de la roca y geométricos.

Un buen estudio de estos parámetros debería permitir:

De la roca in situ	Geométricos
<ul style="list-style-type: none"> • Inferir con cierto grado de certeza, principalmente la hundibilidad de los bloques, el ángulo de subsidencia y el grado de fragmentación; • Predecir el comportamiento estructural del macizo rocoso, de modo tal que se pueda elegir en una primera aproximación los tipos de fortificaciones necesarias para los diseños propuestos; • Elegir la o las variantes de explotación que entreguen diseños acordes al macizo rocoso definido; • Discriminar en la planificación las áreas a explotar y la secuencia de hundimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un diseño que permita un eficaz hundimiento de los bloques; • Una adecuada protección de los niveles inferiores al nivel de hundimiento; • Buena recuperación y eficiencia de ley; • Facilidad en la operación de los equipos; • Seguridad en las labores y condiciones ambientales; • Flexibilidad en cuanto a modificaciones y a cambios de programas; • Velocidad o ritmo de explotación deseada.

Tabla 3 Resultados del estudio de la roca y geometría del yacimiento.

Sin duda uno de los factores de mayor incidencia en el manejo de minerales en minería de block caving es la granulometría del mineral, producto del proceso mecánico del hundimiento. El problema de la fragmentación se ha ido agravando a medida que

las minas se han ido acercando al mineral primario. Un claro ejemplo es el caso de la mina El Teniente que en el año 1972, al llegar a la roca primaria la productividad se redujo a valores entre los 20 a 30 (t/hombre-turno), en contra de un promedio de 200 en mineral secundario (J. Chacón et al, 2004).

La aplicación de uno u otro sistema de manejo de minerales tiene diferentes beneficios y costos de acuerdo al caso. La restricción impuesta por estos sistemas puede conducir a la elección de uno u otro según el caso de estudio (Arancibia et al., 2008). Entre los aspectos que deben considerarse cabe señalar:

- **Deformación impuesta por el sistema de manejo de minerales:** la aplicación de cualquier sistema de manejo de minerales generará deformaciones sobre el arreglo original debido a los equipos y adaptaciones que éstos puedan requerir. El mejor caso conocido es el caso del LHD, el cual requiere distancias mínimas de operación;
- **Restricciones sobre el equipo y tránsito de trabajadores:** dependiendo del tipo de sistema de manejo de minerales éstos serán restricciones que harán la operación más o menos simple;
- **Capacidad de realizar las construcciones:** el sistema de manejo de minerales impone un diseño geométrico de la malla de extracción que no siempre facilita su construcción, las cuales imponen límites en tiempo y costos de la solución aplicada. Puede ocurrir incluso que la situación proyectada en que el diseño no se pueda llevar a cabo debido a las condiciones de estabilidad. Por ejemplo, algunos diseños muestran importantes deformaciones, con elipsoides traslapados en algunas direcciones y distancias excesivas en otros, donde el mineral no se mueve. Luego el diseño se obtiene de la prioridad dada por el diseñador al sistema de manejo de minerales contra otros factores tales como la mayor recuperación y menor cantidad de dilución.

-

3.3 CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS PARA EL MANEJO DE MINERALES

Los equipos se clasifican según la función que pueden satisfacer. Es así como se distingue entre equipos de carguío, de transporte y mixtos. Los primeros realizan principalmente la labor de carga del material desde la frente de trabajo hacia un equipo de transporte que llevará el material a un determinado destino (planta, botadero, stock). Los equipos de carguío pueden separarse a su vez en unidades discretas de carguío, como es el caso de palas y cargadores, o bien, como equipos de carguío de flujo continuo, como es el caso de excavadores de balde que realizan una operación continua de extracción de material. Otra forma de diferenciar los equipos de carguío considera si éstos se desplazan o no, por lo que se distingue entre equipos sin acarreo (en general su base no se desplaza en cada operación de carguío) y equipos con acarreo mínimo (pueden desplazarse cortas distancias).

Los equipos de transporte tienen por principal función desplazar el material extraído por el equipo de carguío hacia un punto de destino definido por el plan minero. Pueden tener un camino fijo como es el caso de trenes que requieren el tendido de líneas férreas, o bien pueden desplazarse por circuitos definidos, como es el caso de los camiones. Además, se pueden dividir en unidades discretas, como es el caso de camiones y trenes, o equipos de transporte de flujo continuo. En esta última categoría califican las correas transportadoras. Un equipo de transporte, bastante conocido en la industria del carbón, y que es objetivo de este trabajo es el transportador de cadenas (Panzer) o también conocido como Armored Face Conveyor (AFC).

Finalmente, se pueden definir los equipos mixtos, que pueden realizar en una sola operación el carguío y transporte del material. El equipo de mayor interés en esta categoría corresponde al Load Haul Dump (LHD), que es una pala de bajo perfil para minería subterránea, que tiene autonomía para realizar eficientemente traslados de

hasta 300 metros de material (Le.feaux, 1997), con rendimientos decrecientes en función de la distancia recorrida.

En este capítulo se hará una revisión del estado del arte de los equipos que componen el nuevo sistema de manejo de minerales propuesto, siendo éstos los equipos LHD y el equipo Panzer.

3.3.1 Equipos LHD:

De la evolución de los equipos de carguío par interior mina, a principios de los años 60 aparecen los LHD (load-haul-dump), que basados en el concepto de Cargar-Transportar y Descargar surge como la solución más efectiva para compatibilizar la terna Rendimiento-Capacidad-Maniobrabilidad. Esta estaba limitada principalmente a la necesidad de minimizar el desarrollo de infraestructura y por ende el costo que implica construir accesos a labores subterráneas. Los LHD corresponden a palas de bajo perfil que pueden clasificarse tanto como equipos de carguío con acarreo mínimo o como equipo combinado de carguío y transporte. Tienen la particularidad de poseer un balde (o cuchara, de ahí que también se denominen *scoops*) de gran tamaño, el cual puede ser elevado para cargar un equipo de transporte, tal como un camión de bajo perfil o un camión convencional. Poseen una gran versatilidad y por ende son equipos de alta productividad a un bajo costo operacional.

A mediados del año 1960, los equipos LHD fueron establecidos firmemente como una parte fundamental de lo que se ha conocido como “trackless mining concept”, usándose en muchas minas del mundo. La flexibilidad, movilidad, y versatilidad de estas unidades han dado a la industria una herramienta útil y han añadido nuevas dimensiones para el desarrollo y producción minero. Muchas minas antiguas fueron incluso re-diseñadas para acomodarse al uso de estos equipos (Stevens R. M., Acuña A., 1982).

El LHD está capacitado para cargar camiones de bajo perfil y camiones convencionales de altura adecuada, puede también descargar sobre piques de traspaso o sobre suelo para que otro equipo continúe con el carguío.

Estos equipos cargan, acarrean y vacían el mineral de forma discreta, por lo que se caracteriza por tener un tiempo de ciclo asociado a cada operación. Los tiempos asociados al ciclo son básicamente los siguientes:

- Tiempo de carga (T_c);
- Tiempo de descarga (T_d);
- Tiempo maniobra (T_m);
- Tiempo de viaje con el balde lleno (T_{vc}); y
- Tiempo de viaje con el balde vacío (T_{vv}).

Solo los 2 primeros son considerados como tiempos fijos, que dependen exclusivamente del equipo en sí. Mientras que los restantes son considerados como tiempos variables, pues dependen del estado del camino, distancia de acarreo, carga del equipo (tipo de mineral), pendiente, experiencia del operador, visibilidad, entre otros. Una buena manera de estimar el rendimiento de estos equipos es contar con buena información, fidedigna, del tiempo de ciclo. El tiempo de un ciclo (T_{ciclo}), medido en minutos, de un LHD queda definido como sigue:

$$T_{ciclo} = T_c + T_d + T_m + T_{vc} + T_{vv}$$

Ecuación 1 Cálculo de tiempo de ciclo para LHD.

El rendimiento horario de una pala LHD se calcula de la siguiente manera.

$$N^{\circ} \text{ ciclo } \left[\frac{\text{ciclo}}{\text{hora}} \right] = \frac{60}{(T_c + T_d + T_{vc} + T_{vv} + T_m)}$$

Ecuación 2: Cálculo de N° de ciclos por hora para LHD (Le-feaux, 1997).

Donde:

- T_c*: Es el tiempo que el LHD demora en promedio en cargar el balde en el punto de extracción. Está medido en minutos.
- T_d*: Es el tiempo que el LHD demora en promedio en vaciar el balde en el punto de vaciado. Está medido en minutos.
- T_{vc}*: Es el tiempo que el equipo LHD demora en promedio en viajar desde el punto de extracción hasta el punto de vaciado con el balde lleno. Está medido en minutos.
- T_{vv}*: Es el tiempo que el equipo LHD demora en promedio en viajar desde el punto de vaciado hasta el punto de extracción con el balde vacío. Está medido en minutos.
- T_m*: Es el tiempo que el operador del equipo LHD demora en promedio para realizar las maniobras de un ciclo. Está medido en minutos.

Luego, se calcula el rendimiento de la pala con la siguiente ecuación.

$$\text{Rendimiento} \left[\frac{\text{toneladas}}{\text{hora}} \right] = \frac{N^{\circ} \text{ ciclo} \times C_b \times F_{ll} \times d_{mxx}}{(1 + esp)}$$

Ecuación 3: Cálculo de rendimiento para LHD (Le-feaux, 1997).

Donde:

- N° ciclo*: es el número de ciclo que un equipo LHD es capaz de realizar en una hora. Esta medido en ciclos por hora.
- C_b*: Es la capacidad de balde que tiene un equipo LHD en particular. Está medida en m³.
- F_{ll}*: Es el factor de llenado que tiene el balde del LHD al momento de cargar. Está medido en tanto por uno.
- d_{mxx}*: Es la densidad in situ del mineral a transportar. Está medida en t/m³.
- esp*: Es el esponjamiento del mineral, producto de la fragmentación de éste. Está medido en tanto por uno.

En la siguiente figura se muestra el perfil de un equipo LHD.



Figura 13: Perfil de un equipo LHD.

Algunos factores que afectan la productividad y la operación del LHD son (Le-feaux, 1997):

- Iluminación;
- Estado de las pistas de rodado (derrame de carga, impacto en componentes mecánicos, impacto sobre el operador, disminución de velocidad, desgaste de neumáticos que deberían durar 2000-2500 horas según catálogo 3000 horas y puede bajar a 1800 horas);
- Área de carguío (debe tener piso firme para que no se entierre el balde y no genere esfuerzos que puedan dañar el equipo, por ejemplo al cilindro central de volteo);
- Granulometría del material a cargar (colpas muy grandes disminuyen factor de llenado);
- Vías de tránsito y tráfico;
- Áreas de carga y descarga;
- Ventilación (polvo y falta de oxígeno);
- Altura sobre el nivel del mar (se pierde 1% de potencia cada 100 metros a partir de los 300 metros sobre el nivel del mar. Para alturas superiores a 1.500 msnm se adicionan turbos);
- Temperatura (cada 2 °C en ascenso se pierde 1% de potencia a partir de los 20 °C);
- Interferencias con otras operaciones mineras, tales como largadura y tronadura secundaria.

El mercado de los equipos LHD ofrece una gran variedad de modelos, de diferentes tamaños, con capacidades de balde que van desde 1,7 hasta 14 yd³. Según sean las necesidades, se disponen de versiones con accionamiento Diesel o con accionamiento Eléctrico.

3.3.2 *Equipo de transporte Panzer*

Este equipo consiste en una coraza metálica sobre la cual está montado un sistema de cadenas cuyo movimiento produce el transporte del material ubicado sobre ellas. Un conjunto de placas ubicada espacialmente sobre las cadenas (cada 1 metro aproximadamente) facilita la operación

Los distintos tipos de Panzer difieren principalmente por el número de cadenas y arreglo en que están dispuestas, distinguiéndose 4 tipos: single-center (SCS), double-center (DCCS), double outboard (DOCS) y triple-chain strand (TCS).

El tamaño de las cadenas es otro factor a considerar, pues determina la resistencia del sistema de transporte. El ancho de la coraza también es importante, pues determina en gran medida la capacidad de transporte. Los anchos varían entre 800 a 1100 (mm).

La capacidad de transporte en un Panzer para la minería del carbón, Q_p en tph, puede ser determinada por las siguientes relaciones (Carrasco, 2002):

$$Q_p = q_c * V_c = 60 * A_{max} * \Psi * \gamma_c * V_c$$

Ecuación 4: Capacidad de transporte de un Panzer.

$$q_c = \Psi * \gamma_c * V_c$$

Ecuación 5: Determinación del peso del carbón en un Panzer.

Donde:

q_c : Es el peso del carbón cargado por unidad de largo del Panzer (t/m);

- A_{max} : Es la mayor sección cargada en la línea del Panzer, la cual depende de la construcción y ancho de la coraza, tipo de cadena, ángulo de reposo del carbón quebrado y el peso de las placas de arrastre;
- Ψ : Es el coeficiente de carga, generalmente su valor se encuentra entre 0,65 y 0,90, dependiendo de la inclinación del piso, la dureza y fragmentación del carbón, características estructurales de la coraza y la placa de arrastre;
- γ_c : Es la densidad esponjada del carbón cargado, generalmente varía entre 0,88 y 1,22 (t/m³);
- V_c : Es la velocidad del sistema de cadenas, usualmente entre 76 a 92 (m/min) (250 a 300 fpm).

Los Panzer disponibles poseen capacidades nominales que varían entre 1400 a 4500 (tph), dependiendo del ancho de la coraza (800 a 1100 (mm), respectivamente), para minerales de carbón (Carrasco, 2002).

Algunas características de este tipo de transporte son:

- Permiten transportar entre 18 a 31 (t/min) de mineral de carbón;
- Ancho de la coraza varía entre 760 a 965 (mm);
- Alta flexibilidad que le permite trabajar en configuraciones que poseen ángulos de hasta 90° en la horizontal.

Este tipo de sistema son suficientemente robustos en su diseño y configuración, por lo que su aplicación a roca dura se puede realizar sin mayores consideraciones (Carrasco, 2002).

Los sistemas mencionados poseen integrados sistemas de automatización y control, lo que permite altos rendimientos y minimiza la necesidad de operarios. Sin embargo, existen consideraciones de diseño, referentes a la granulometría y abrasividad del material cargado, que es necesario tener en cuenta. Estas consideraciones limitan, por un lado, la capacidad de transporte y tamaño de los equipos requeridos y, por otro

lado, la vida útil estimada del equipo que puede ser menor respecto al caso de la minería del carbón (Carrasco, 2002).

Si bien actualmente no existen faenas mineras de minería metálica que esté usando este tipo de equipo para realizar la labor de transporte, se han realizado varias pruebas por parte de Codelco e IM2. Como ejemplo, está el caso de las pruebas realizadas en la mina El Salvador, bajo el proyecto de Minería Continua (Carrasco, 2002).



Figura 14: Vista de operación del equipo Panzer en minería metálica.

Como se indica en la tabla 3-3, las pruebas de IM2 para un Panzer de 60 (m) de longitud y una velocidad de 0,63 (km/h), se tiene un rendimiento máximo de 700 (t/h), para las 80 t de transporte máximas. En las mismas pruebas, indican existencias de rendimientos puntuales sobre las 1000 (tph). Para estimar el rendimiento anterior se consideraron los siguientes parámetros operacionales.

Panzer	Capacidad transporte máx.	80	t
	Distancia media de transporte	30	m
	Disponibilidad mecánica	90	%
	Factor de llenado	85	%
	Vida útil	250.000	hrs
	Consumo eléctrico motor	95,16	kWh/h
	Velocidad media	0,63	km/h
	Vida útil plancha	2500.000	t
	Vida útil plancha	8.754	hrs

Tabla 4: Parámetros operacionales transportador de cadenas Panzer (IM2).

Se considera un valor de vida útil para la estructura y motores, y otro para las planchas de desgaste. Esta diferenciación permite estimar el costo de cambiar las planchas del equipo sin incurrir en la sobrestimación de considerar el valor que posee el equipo completo, el cual no tiene un factor de desgaste mayor. Por lo tanto, se considera que la vida útil de una plancha de desgaste es de 2.500 (kt), lo que es equivalente a decir que, con el rendimiento efectivo que posee este equipo, la vida útil de las planchas es de 8.754 (hrs). En cambio, en el caso de la estructura y motores del Panzer, los cuales tienen una larga duración, al ser estructuras robustas y motores eléctricos, se considera una vida útil de 250.000 (hrs).

En las pruebas realizadas en El Salvador se pudo verificar la partida sin problemas del equipo Panzer con carga completa a lo largo de toda su extensión. Además el equipo puede operar a velocidades variables con el objeto de regular el flujo de alimentación al chancador y evitar derrames. Este equipo también puede retroceder, con el objeto de solucionar problemas de atascamiento o para una óptima ubicación de bolones que deben ser reducidos.

El transportador Panzer se mueve gracias a la fuerza generada por dos motores eléctricos, sobre los cuales no se ha medido consumo hasta el momento, por lo tanto se utiliza una técnica indirecta para conocer este valor. Se ha estimado que el Panzer tiene un consumo eléctrico de 95,16 (kW/h).

En función de los resultados de operación del equipo se ha propuesto (IM2) una curva de confiabilidad indicada en el gráfico siguiente, respecto a la probabilidad de falla en función de las horas de operación continua.

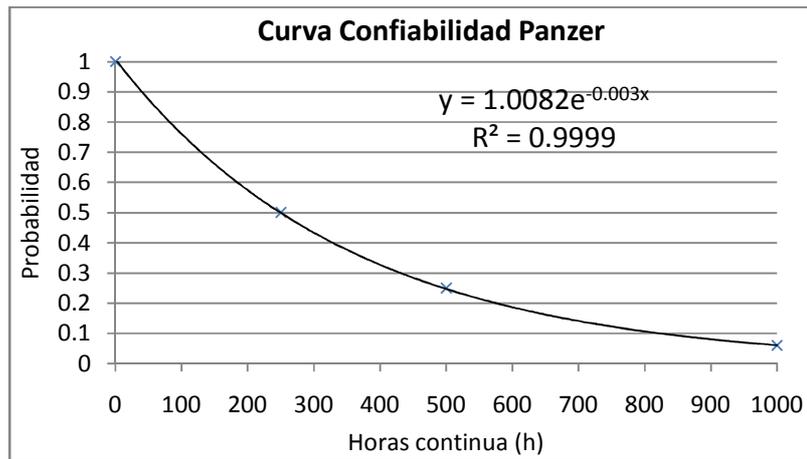


Gráfico 1: Curva de confiabilidad para Panzer en minería continua El salvador.

Esta curva representa la curva de confiabilidad, representado solamente por medio de la frecuencia de fallas en cada cierto tiempo, medido en horas. Las fallas de los equipos se representan por su curva de confiabilidad, la cual dada una probabilidad entrega el tiempo en que el equipo funciona sin interrupciones mecánicas.

En la minería metálica, actualmente, se ha probado con buenos resultados en distancias cortas, alrededor de 80 (m). Para ello, el diseño del Panzer con respecto a la minería del carbón, fue reforzado para tener un equipo de alto grado de robustez y que trabaje en condiciones exigentes de operación.

3.4 ÍNDICE DE VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN

La velocidad o tasa de extracción está definida como la cantidad de material que se extrae desde un área determinada durante un tiempo específico. Matemáticamente se define como:

$$V_{ext} = \frac{\text{Material extraído (t)}}{\text{Área módulo (m}^2\text{)} * \text{Tiempo (día)}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^2 * \text{d}} \right]$$

Ecuación 6: Velocidad de extracción.

La velocidad de extracción es un índice productivo que se debe se debe considerar un par de aspectos fundamentales como:

- Área de explotación: la tasa de extracción puede se calculada tanto para cada punto de extracción como para el área de un módulo, lo que en la práctica proporciona resultados muy dispares, pues en general existen puntos que durante el período de cálculo no están activos o extraen muy poco tonelaje, y otros que se sobre extraen. En la práctica existen restricciones tanto para la velocidad máxima del punto como la del área.
- Tiempo de explotación: éste es fundamental, porque la diferencia de resultados del cálculo en distintos tiempos (horas, días, mes, año) es muy diferente, incluso bajo el supuesto de que el valor es llevado a la unidad básica de día. Un punto que extrae durante todo el año a una velocidad v tiene el mismo índice que un punto que lo hace a $2v$ en la mitad del tiempo. (suponiendo un cálculo anual). Por esto, es de mucha importancia normalizar los resultados a una escala comparable.

En general, la velocidad de extracción actúa como una cota restrictiva en la creación de un plan minero, pues se sabe que si un plan considera valores sobre esta cota, no es operativo, y por ende no tiene valor. En primer lugar esto es porque no se debe extraer a mayor velocidad que la velocidad en que se va generando el material debido a la propagación del caving (velocidad de propagación). La segunda etapa ocurre inmediatamente después de la primera, y se conoce como velocidad de régimen. En esta parte, el cerro ha alcanzado su fragmentación completa, el caving ha llegado a superficie, o ha conectado con material quebrado superior, y por tanto es posible extraer a la velocidad que se quiera, pero restringido por el sistema de manejo de minerales.

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Los factores que inciden mayormente en el manejo de minerales tienen que ver con la roca in situ, y en particular la granulometría del material a tratar.

Existen otros factores que inciden en la productividad y que tienen que ver con el buen estado y mantención de la infraestructura minera en la cual el equipo deberá operar, como por ejemplo, el estado de la calle, la carpeta, presencia de agua, existencia de polvo, ventilación adecuada, estado de los puntos de extracción y de descarga, etc. Un mal estado de estas condiciones podría mermar no solo el rendimiento del equipo, sino también de la vida útil de los componentes del equipo, por ejemplo los neumáticos que finalmente se traduce en mayores costos de extracción.

Si bien los equipos LHD pueden realizar labores de carguío y transporte (equipos mixtos), el estado del arte muestra que no se debe exigir distancias de transporte sobre los 300 metros. Esto debido a que mermaría la vida útil de los componentes mecánicos del equipo, puesto que no fueron diseñados para transportar grandes distancias. Además, disminuiría la productividad del equipo, ya que ésta está en función de la distancia de acarreo. Luego, mientras menor sea la distancia de acarreo, menor será el tiempo de ciclo de la pala, y por ende se esperaría una mayor productividad. La capacidad de carga está sujeta al tamaño del balde, y éste a la vez, del tamaño del equipo LHD.

El equipo de transporte Panzer promete ser un equipo bastante robusto y confiable para el manejo de minerales de mayor densidad, abrasividad y dureza en comparación al carbón. Ahora hay que ver de qué manera se puede relacionar este equipo con las palas LHD para tener un sistema de carguío y transporte lo más eficiente posible.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES COMPUESTA POR LHD Y PANZER.

4.1 INTRODUCCIÓN

El diseño propuesto tiene la siguiente configuración: un número de LHD's que carga su balde, para luego descargar sobre un pique corto. El mineral se traslada por el pique de traspaso por efecto de la gravedad, llegando a un equipo alimentador (feeder), el cual se encarga de traspasar el mineral a un equipo transportador llamado Panzer. Finalmente este equipo acarrea continuamente el mineral hacia un chancador u otro sistema de transporte.

La granulometría del mineral a tratar en los puntos de extracción definirá el tamaño de equipo a usar y el diámetro del pique de traspaso. Además, la estimación previa del rendimiento del equipo a utilizar en las operaciones de carguío y transporte es de suma importancia para poder estimar la flota de equipo y la productividad esperada. La estimación de rendimiento junto con los índices de operación es de suma importancia para definir el diseño de un módulo productivo, puesto que estos parámetros determinarán la capacidad productiva por unidad de tiempo, fundamental para la etapa de planificación minera.

Un módulo productivo se caracteriza por tener un número de calles, con su largo respectivo, relacionadas a un Panzer. Esto definirá el área de influencia de un módulo en el nivel de extracción.

El objetivo de este capítulo es proponer una metodología para relacionar calles con LHD a un Panzer, permitiendo crear diseños para luego determinar aquel que optimice el rendimiento horario de las palas LHD y la productividad del área hundida.

4.2 CONFIGURACIONES DE DISEÑO

Un módulo productivo estará compuesto por los siguientes equipos:

- Palas LHD de un solo tamaño, que pueden ser de 4, 7, 10 ó 13 yd³, uno en cada calle de extracción con sus piques respectivos;
- Un martillo móvil o fijo con parrilla que asegure la granulometría para un flujo continuo en el pique de traspaso;
- Equipos alimentadores estacionarios en el nivel de acarreo que traspasarán el material del pique al Panzer; y
- Un transportador Panzer en el nivel de acarreo, que transportará el material hacia un chancador.

En el siguiente esquema se ejemplifica en forma global y resumida la configuración del sistema de manejo de minerales que se propone en este trabajo.

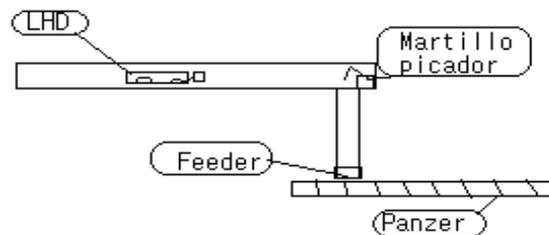


Figura 15: Esquema del sistema de manejo de minerales propuesto.

Inicialmente se analiza 3 configuraciones para el sistema, en función de la ubicación de la galería de panzer. Estas son:

1. Configuración 1: Galería de Panzer perpendicular a calle de producción;
2. Configuración 2: Galería de Panzer paralela a calle de producción;
3. Configuración 3: Galería de Panzer paralela a galería de zanja.

4.2.1 Descripción de las configuraciones propuestas

A continuación se hace una descripción de las configuraciones mencionadas anteriormente, junto a sus respectivas figuras. En todas las configuraciones se consideró un pique corto de 10 (m), que hace el traspaso entre la galería de producción y la de transporte secundario. Este pique tendrá diferentes diámetros considerando los tamaños granulométricos máximos a los que se enfrentará. Por otra parte, se elige un pique corto por las facilidades que da para el traspaso limitando el potencial de colgaduras en altura.

1. Galería de Panzer perpendicular a calle de producción:

Descripción:

Bajo una malla tipo Teniente, la galería de panzer se ubica en un nivel inferior, a 10 (m) por debajo del nivel de producción. Esta galería de transporte se encuentra orientada en forma perpendicular a las calles de producción. Luego, el largo de la galería de panzer estará en función del diseño de malla y el número de calles a ser conectadas con el panzer. Cada calle posee un pique individual.

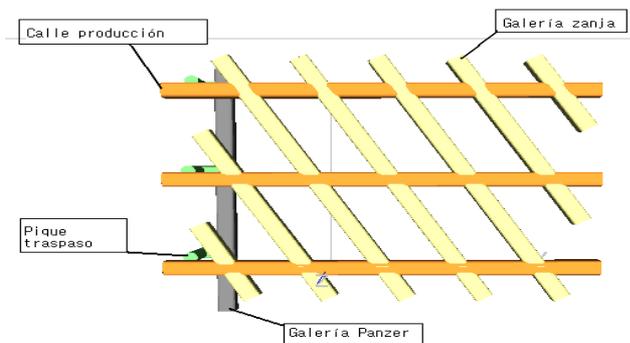


Figura 16: Vista en planta de la configuración 1.

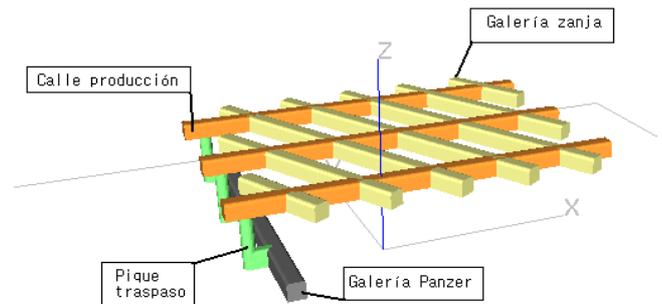


Figura 17: Vista isométrica de la configuración 1.

2. Galería de Panzer paralela a calle de producción:

Descripción:

El panzer está ubicado a 10 (m) bajo el nivel de producción, en la misma dirección de las calles de producción. Dos calles comparten un panzer y cada calle posee su

propio pique vertical de traspaso individual. Los piques se ubican en extremos opuestos de las calles para evitar posible sobre llenado de material en un punto del panzer.

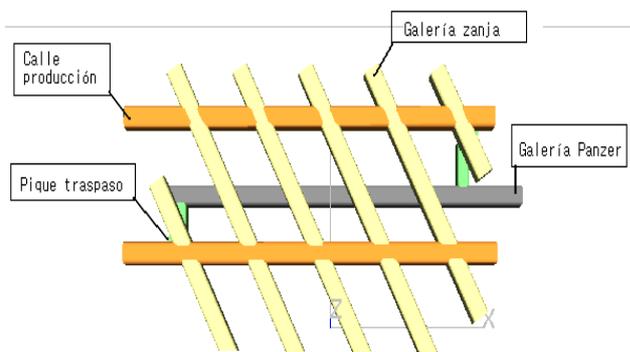


Figura 18: Vista en planta de la configuración 2.

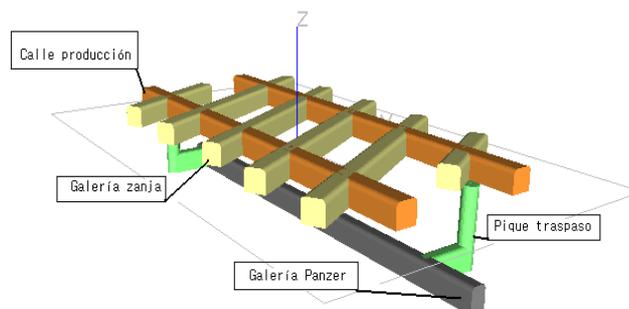


Figura 19: Vista isométrica de la configuración 2.

3. Galería de Panzer paralela a galería de zanja:

Descripción:

El Panzer se ubica en un nivel debajo del nivel de producción, con la misma dirección a la galería de zanja. En la siguiente figura, en vista en planta, no se aprecia la galería de Panzer debido a que está ubicada justo debajo de una de las galerías de zanja.

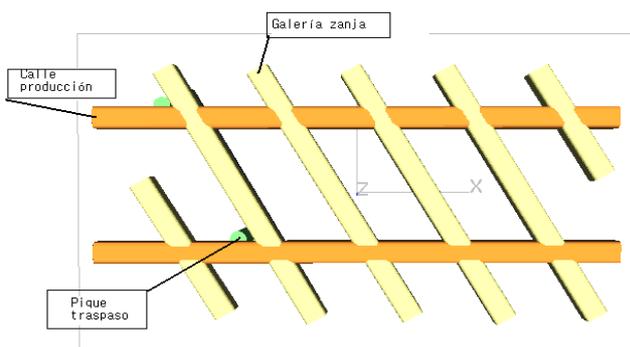


Figura 20: Vista en planta de la configuración 3.

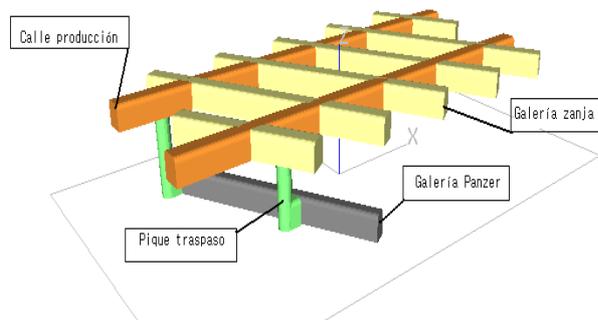


Figura 21: Vista isométrica de la configuración 3.

4.2.2 Evaluación cualitativa de las configuraciones propuestas

A continuación, se hace una evaluación cualitativa de las configuraciones propuestas con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa a desarrollar para generación de diseños. Esta evaluación se hace mediante los siguientes criterios:

1. Ubicación de pique de traspaso en el nivel de extracción;
2. Flexibilidad en operación;
3. Facilidad de estimar productividad de un módulo;

<i>Configuración 1</i>	<i>Configuración 2</i>	<i>Configuración 3</i>
En el nivel de extracción, permite ubicar puntos de vaciado de forma regular, por lo que la distancia media entre punto de vaciado y punto de extracción es igual para toda calle relacionada a un Panzer.	Los puntos de traspaso en el nivel de extracción se pueden ubicar de forma regular para cada calle, lo que permite tener la misma distancia media de acarreo de pala para las calles relacionadas al Panzer.	Si se mantiene igual la distancia entre pique de traspaso y el Panzer en el nivel de acarreo, la distancia media de acarreo de LHD será distinta dependiendo de la calle relacionada al Panzer.
Tiene mayor flexibilidad de operación dado que se pueden generar alternativas que permitan la continuidad de la labor de extracción por una eventual falla del equipo Panzer.	No posee flexibilidad de operación puesto que ante una eventual falla del Panzer, los LHD de las calles relacionadas en el nivel de extracción deberán parar sus labores.	Al igual que la configuración 1, entrega flexibilidad de operación de las calles debido a una falla del Panzer.
Dado que todas las calles tienen una misma distancia de acarreo, es fácil poder determinar la productividad de un módulo (conjunto determinado de calles).	Al igual que la configuración 1, dado que los piques se pueden ubicar de forma regular, permite facilitar el cálculo de la productividad del módulo..	Dado que la distancia media de acarreo de las palas varían, el rendimiento de las palas variará según la ubicación de la calle con respecto al Panzer

Tabla 5: Comparación cualitativa de las configuraciones de diseño.

En resumen, la Configuración 1: Galería de Panzer perpendicular a calles de producción posee ventajas comparativa con respecto a las otras configuraciones

propuestas La configuración paralela restringe la confiabilidad de la calle a la confiabilidad del Panzer, siendo muy de mucho riesgo. Y la configuración 3 hace variar tanto la distancia media de acarreo de LHD como el largo de las calles relacionadas a un Panzer, y dificulta la tarea de estimar la productividad de un módulo. Por tales motivos, este trabajo se desarrollará bajo la configuración perpendicular entre calles con LHD y Panzer.

4.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES LHD-PANZER.

A continuación se detallan la metodología y consideraciones tomadas para la generación de diseños posibles bajo una configuración perpendicular de LHD-Panzer.

1. Se considerará como input al sistema los siguientes parámetros:

- *Diseño de malla de extracción:* la distancia entre calles de producción permitirá determinar el número máximo de calles relacionados a un largo determinado del Panzer. El espaciamiento entre puntos de extracción solo afectará al número de éstos en un área dado para un largo de calle de extracción.;
- *Rendimiento del equipo Panzer:* esta información permitirá conocer la productividad de un módulo y será la productividad a lograr con las palas LHD;
- *Estimación de índices operacionales de los equipos:* estos parámetros permitirán incluir en el cálculo el tiempo en que los equipos estarán operativos por turno o por día, y así estimar la productividad media efectiva del sistema. Los índices operacionales considerados son la utilización y disponibilidad del equipo LHD, así como las disponibilidades de los equipos alimentador estacionario y Panzer. La utilización de los equipos (alimentadores y Panzer) se asumen al máximo medio esperado.

2. Se buscan diseños que permitan igualar la productividad del nivel de extracción con la productividad del nivel de acarreo con la finalidad de minimizar la interferencia de uno sobre el otro y evitar la sub-utilización de éstos. En otras palabras, se buscan condiciones de operación y diseños que permitan saturar al equipo transportador Panzer. Para ello, se propone la siguiente ecuación:

$$(N^{\circ}calles) \times R_{LHD} \times U_{LHD} \times D_{feeder} \times D_{Panzer} \times 24 = (N^{\circ}Panzer) \times R_{Panzer} \times D_{Panzer} \times 24$$

Ecuación 7: Ecuación de diseño LHD-Panzer.

Donde:

- N° calles: es el número de calles de producción con LHD asociados a un Panzer;
- R_{LHD} (tph): es el rendimiento estimado del equipo LHD. Variará principalmente por la distancia media de acarreo entre el punto extracción y el punto de vaciado;
- U_{LHD} (%): es la utilización esperada del equipo LHD debido a interferencias operacionales ocurridos en la calle de extracción;
- D_{feeder} (%): es la disponibilidad de los equipo feeder que alimentan al Panzer;
- N° Panzer: es el número de Panzer asociado a un módulo. En este trabajo siempre será 1;
- R_{Panzer} (tph): es el rendimiento medio esperado del equipo Panzer;
- D_{Panzer} (%): es la disponibilidad del equipo Panzer.

Hay que señalar que el N° de calles será una variable y que $U_{LHD} = U_{efect} \times D_{LHD}$. El rendimiento de las palas dependen de la distancia media de acarreo y de su capacidad.

3. Se grafican las curvas de productividad de los LHD asociados a una calle de extracción, en tph, en función al número de éstas. Se hace el supuesto que la productividad de N calles será equivalente al producto entre el rendimiento de un LHD y el número de calles, dado que cada calle posee un punto de vaciado

individual. Para el cálculo de la productividad en función del número de calles se consideran los índices operacionales que figuran en la ecuación 4-2. Éstos son: U_{LHD} , D_{feeder} y D_{Panzer} y el producto con el rendimiento nominal del LHD dará un rendimiento efectivo, que considera las interferencias operacionales del sistema de manejo de minerales. Esto se puede ver mediante el ejemplo del siguiente gráfico.

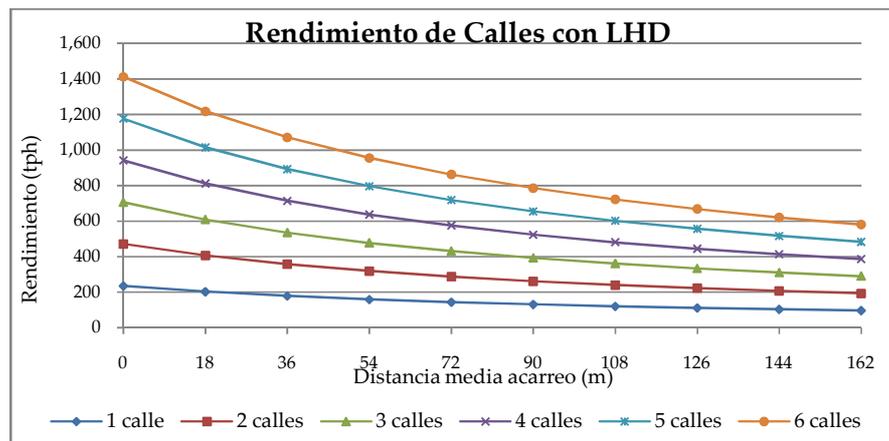


Gráfico 2: Ejemplo Curvas de rendimiento de calles con LHD.

Este ejercicio se repite para cada capacidad de pala LHD.

- Se grafica la curva del rendimiento promedio del equipo Panzer, considerando la disponibilidad de éste, en el gráfico anterior. Se hace el supuesto de que por tratarse de un equipo continuo, la productividad será constante. Además, se supondrá que el equipo operará acarreado minerales mientras esté disponible. Gráficamente quedará como sigue.

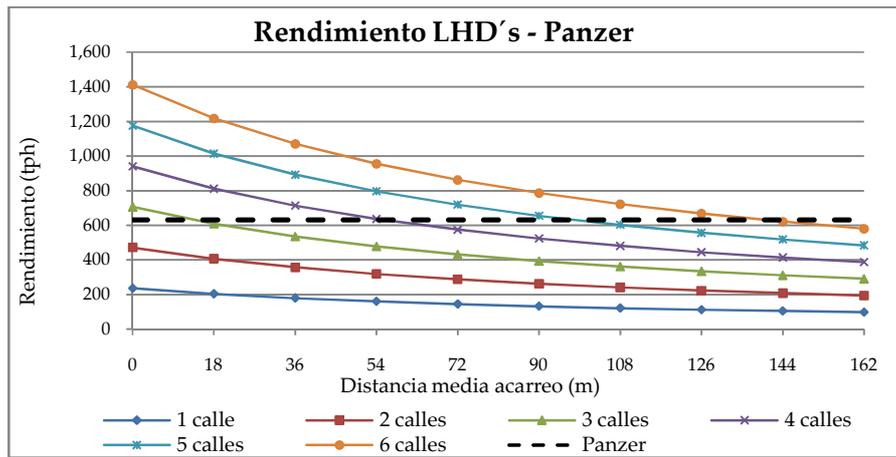


Gráfico 3: Ejemplo Curvas de rendimiento efectivo de LHD's - Panzer.

5. Como las palas LHD poseen un largo de equipo definido según su capacidad, se considerarán opciones con distancia media de acarreo mayores a 20 (m). Esta condición puede ser variado según criterio del diseñador. Finalmente, el gráfico que importa tendrá la siguiente forma.

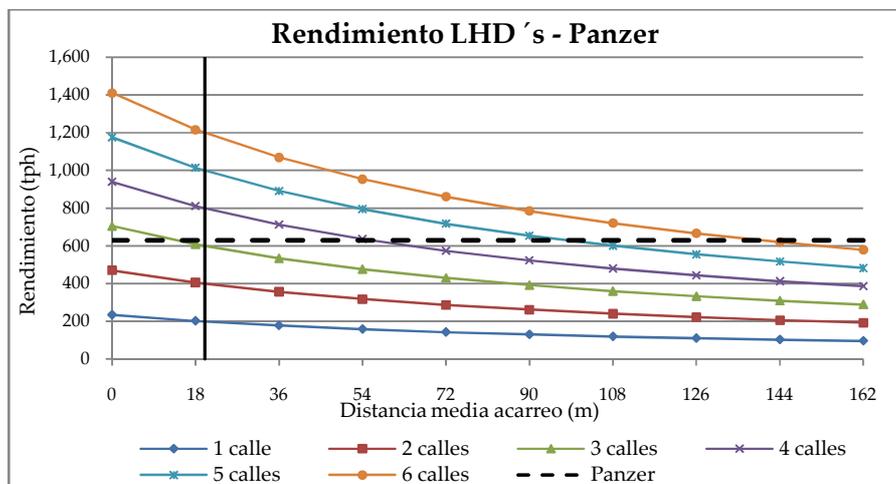


Gráfico 4: Ejemplo Curvas de rendimiento efectivo de LHD's - Panzer final.

Las intersecciones entre las curvas de productividades de las calles con LHD operando y la del equipo Panzer indican el punto óptimo en el que se cumple la condición de igualdad de productividad como se había mencionado en el punto 2. El eje x indica la distancia media de acarreo de las calles de extracción

relacionadas al Panzer y la curva del rendimiento de las calles con LHD indicará el número de calles con LHD que deberá tener un módulo (N° de calles). Cada intersección de las curvas de productividad será un diseño modular, entregando como resultado las condiciones geométricas de cada uno a saber: número de calles con LHD relacionados al Panzer y el largo de las calles. A la vez, la distancia media de acarreo será un dato para estimar el rendimiento de las palas LHD.

6. La distancia media de acarreo de las palas LHD de los diseños se pueden calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d = \left[\frac{(N^{\circ}calles \times Cb \times Fll \times \rho \times 60) \times (U_{LHD} \times D_{feeder} \times D_{Panzer})}{(N^{\circ}Panzer \times (1 + e) \times R_{Panzer} \times D_{Panzer})} - (T_c + T_d + T_m) \right] \times \left[\frac{(V_v \times V_c)}{(V_v + V_c) \times 60} \right]$$

Ecuación 8: Fórmula para distancia media de acarreo de LHD.

Esta ecuación proviene de la ecuación 4-2 y es el resultado de un ejercicio algebraico.

7. Con la productividad diaria esperada y las condiciones geométricas de los diseños, es posible calcular la velocidad de extracción y el rendimiento de las palas LHD.
8. Finalmente se seleccionan aquellos diseños que maximizan la productividad por área hundida y el rendimiento de los equipos LHD.

A modo de ejemplo se hará un ejercicio para capacidades de palas LHD de 4, 7, 10 y 13 yd³. Para ello, al no contar con los parámetros de entrada, será necesario determinarlos, tomando ciertas consideraciones y datos de benchmarking con respecto a faenas en operación.

4.3.1 Ejemplo de la metodología propuesta:

1. Cálculo de los parámetros de entrada:

a. Diseño de malla de extracción:

El resultado de los diseños de la malla de extracción a utilizar, para cada capacidad de pala LHD, se muestra en la tabla siguiente.

Modelo LHD	Capacidad balde (yd ³)	Diseño malla (m x m)
Toro 6/6M	4	12 x 15
Toro 7/7M	7	13 x 16
Toro 0010	10	15 x 17
Toro 11	13	17 x 18

Tabla 6: Diseño de las malla de extracción a usar en el ejemplo.

Los detalles de los supuestos y cálculos de las mallas de extracción que consideran el tamaño de las palas, se pueden ver de manera más detallada en el Anexo A del capítulo de Anexos.

b. Estimación de rendimientos de los equipos LHD y Panzer:

b.1) Rendimiento de las palas LHD:

A continuación se tienen las curvas de rendimiento de las palas LHD en toneladas por hora. Consideraciones y cálculos detallados se pueden ver en Anexo B.

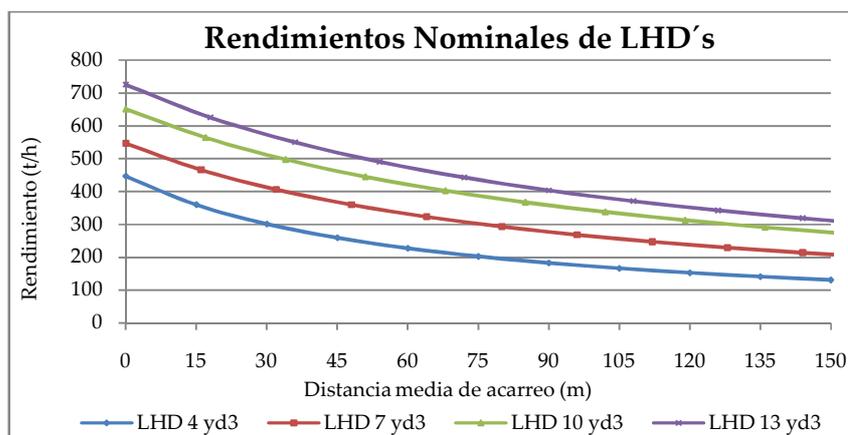


Gráfico 5: Rendimientos nominales de una pala LHD en función de la capacidad y distancia de acarreo.

Los resultados anteriores corresponden a rendimientos nominales. Es decir, no están consideradas las interferencias operacionales.

b.2) Rendimiento del equipo Panzer:

El panzer es un equipo de transporte continuo, que tiene la ventaja de manejar materiales de fragmentación gruesa y abrasiva, es decir, se trata de un equipo robusto. Las informaciones que se cuenta hasta ahora provienen de pruebas realizadas por Codelco e IM2, en el marco del estudio de la Minería Continua (MC).

En las pruebas de Minería Continua, realizadas en la mina El Salvador de Codelco, se trabajó con un Panzer de largo 75 (m) de longitud. En estas pruebas se registraron rendimientos medios del Panzer entre 600 y 700 (t/h) y rendimientos puntuales por sobre las 1.000 (t/h), ver Tablas 4-10 con registros de Marzo y Abril de 2007. Se han realizado pruebas con granulometría gruesa, no teniendo mayores problemas.

FECHA	27 de Marzo de 2007			
Hora	Tiempo Parcial	Tonelaje		Rendimiento Ton/Hora
		Ac	Parcial	
10:48		8		
10:49	1	9	1	60
10:50	1	19	10	600
10:51	1	35	16	960
10:52	1	53	18	1.080
10:53	1	72	19	1.140
10:54	1	87	15	900
10:57	3	137	50	1.000
11:10	13	277	140	646
11:22	12	407	130	650
11:25	3	434	27	540
11:26	1	455	21	1.260
11:30	4	495	40	600
11:35	5	506	11	132
11:48	13	625	119	549
Total	60		617	617

Tabla 7: Ejemplo registros parciales de rendimiento del Panzer en El Salvador, mes de Marzo del 2007.

FECHA	10 de Abril de 2007			
Hora	Tiempo Parcial	Tonelaje		Rendimiento
		Ac	Parcial	Ton/Hora
16:02		0		
16:18	16	200	200	750
16:32	14	360	160	686
16:42	10	500	140	840
16:51	9	600	100	667
16:56	5	650	50	600
17:00	4	679	29	435
Total	58		679	702

Tabla 8: Ejemplo registros parciales de rendimiento del Panzer en El Salvador, mes de Abril del 2007.

El tamaño máximo de los bolones transportados fue de 2,5 metros aproximados en su extensión más larga, lo que permite mover los bolones de gran tamaño a un punto determinado para realizar la reducción secundaria en el chancador. Los bolones de dimensiones superiores al tamaño de alimentación del chancador o que por su geometría no pudieron ser transportados por el Panzer al quedar sobre los bordes, fueron reducidos mediante el método tradicional de perforación y tronadura o la aplicación de conos APD sobre el Panzer. Se probó también aplicando la nueva tecnología de reducción mediante fractura hidráulica con jumbo. Ambas aplicaciones tuvieron los resultados esperados y no provocó problemas ni daños al sistema. La estructura robusta de este equipo resiste adecuadamente los esfuerzos típicos de la reducción secundaria.

Los últimos análisis realizados por el fabricante, indican que:

- Un Panzer de 70 (m), con 2 motores de 75 (kW) instalados, empleando cadenas de 42 x 146 (mm), posee una capacidad técnica de 700 (tph), con una velocidad de cadena de 0,16 (m/s). La carga que acepta es de 87 (t), y es capaz de partir desde velocidad 0 con esta carga.
- Un Panzer de 120 (m) de largo, requiere de una impulsión de 2 motores de 110 (kW), con cadenas más fuertes de 48 x 144/160 (mm), con una velocidad de

cadena de 0,16 (m/s), para alcanzar una capacidad técnica de 700 (tph). La carga que acepta es de 143 (t) y puede partir con esta carga desde el reposo.

Luego, se considerará como rendimiento medio del equipo Panzer de 700 (tph), con una velocidad media de 0,63 (km/h) y una carga máxima de 80 (t) para un largo no superior a los 120 (m), indicado por el proveedor.

c) Índices operacionales de los equipos

El índice operacional considerado para los equipos LHD es la utilización. Para determinar éste índice, se basó mediante un benchmarking los tiempos de interferencias en el nivel de extracción en minas subterráneas de Codelco. El valor de la utilización de las palas LHD a considerar es de 45%. En el Anexo C se detallan las consideraciones tomadas para llegar al valor mencionado antes.

El índice de operación considerado para los equipos alimentadores estacionarios y Panzer es la disponibilidad mecánica. En la investigación realizada sobre el equipo Panzer se estima que la disponibilidad de este equipo es de 90%. Para el caso de los alimentadores, por falta de información, se supondrá también una disponibilidad de un 90%.

2. Resultados de Diseños

Con los datos obtenidos anteriormente, como parámetros de entrada, se grafican los rendimientos efectivos de los equipos LHD y Panzer como se indicó en la metodología.

Hay que notar que la expresión " $U_{LHD} \times D_{feeder} \times D_{Panzer}$ ", de la ecuación anterior, representa el peor caso para estimación del tiempo operativo de los LHD.

El gráfico generado permitirá definir las configuraciones geométricas de los diseños, tales como:

- Números de calles de extracción con LHD, asociadas a un panzer;

- El largo de las calles de extracción.

El número de calle junto con el diseño de la malla de extracción, permitirá determinar el largo del Panzer; y la distancia media de acarreo determinará el rendimiento del equipo LHD, bajo las condiciones consideradas en este trabajo.

Finalmente se tienen los resultados de diseños LHD-Panzer, para cada capacidad de LHD, con sus respectivas evaluaciones geométricas y productivas.

A. Resultados para LHD de 4 yd³

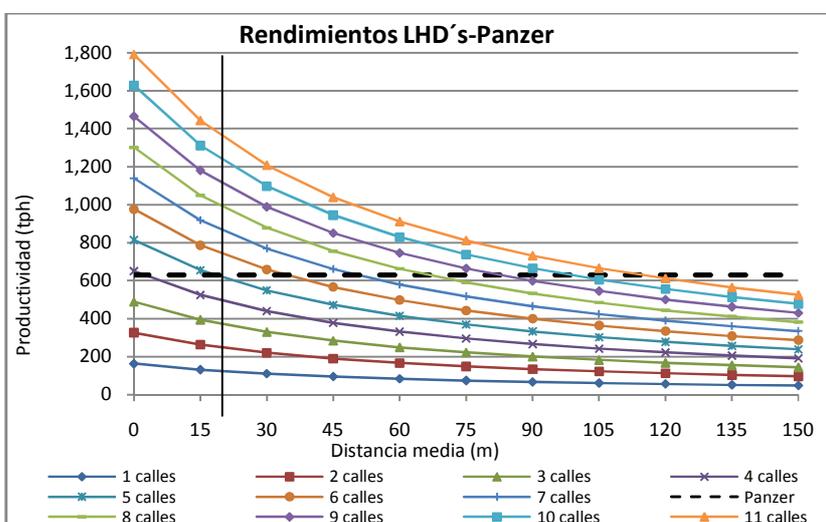


Gráfico 6: Curvas de rendimiento LHD's-Panzer, pala 4 yd³.

Opción	Nº calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	6	34	132
2	7	50	156
3	8	66	180
4	9	82	204
5	10	99	228
6	11	115	252

Tabla 9: Diseños resultantes para pala 4yd³.

	Opción	Nº de Calles	Distancia Media acarreo de LHD (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos Extracción (unidad)	Área influencia del módulo (m ²)
4 yd ³	1	6	34	132	60	10,800
	2	7	50	156	98	17,640
	3	8	66	180	144	25,920
	4	9	82	204	198	35,640
	5	10	99	228	280	50,400
	6	11	115	252	352	63,360

Tabla 10: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 4 yd³.

	Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad de Extracción (t/m ² d)
4 yd ³	1	288	700	15,120	1.40
	2	247	700	15,120	0.86
	3	216	700	15,120	0.58
	4	192	700	15,120	0.42
	5	173	700	15,120	0.30
	6	157	700	15,120	0.24

Tabla 11: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 4 yd³.

Se observa que no existe diseño posible para los parámetros considerados, porque todos sobrepasan el largo máximo del equipo Panzer impuesta por el fabricante (<120 m).

B. Resultados para LHD de 7 yd³.

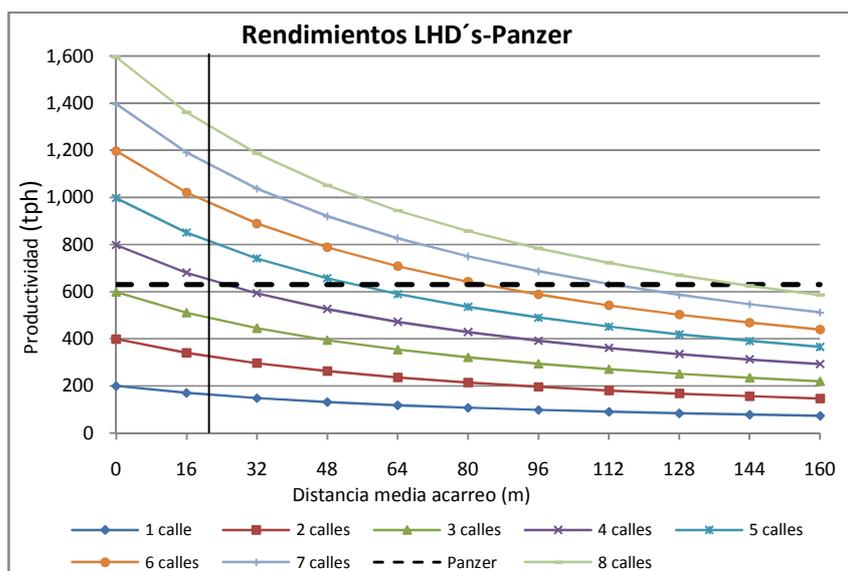


Gráfico 7: Interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd³.

Opción	Nº calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	25	91
2	5	54	117
3	6	83	143
4	7	113	169
5	8	142	195

Tabla 12: Diseños resultantes para pala 7 yd³.

	Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo de LHD (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos Extracción (unidad)	Área influencia del módulo (m ²)
7 yd ³	1	4	25	91	32	6,656
	2	5	54	117	70	14,560
	3	6	83	143	132	27,456
	4	7	113	169	210	43,680
	5	8	142	195	288	59,904

Tabla 13: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 7 yd³.

	Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad de Extracción (t/m ² d)
7 yd ³	1	432	700	15,120	2.27
	2	346	700	15,120	1.04
	3	288	700	15,120	0.55
	4	247	700	15,120	0.35
	5	216	700	15,120	0.25

Tabla 14: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 7 yd³.

El diseño que maximiza el rendimiento de las palas LHD de 7 yd³ y la productividad por área hundida es la opción 1 con 432 (tph) y 2,3 (t/m²d) respectivamente. El diseño está compuesto por 4 calles de extracción de 50 metros de largo, con 32 puntos de extracción y un largo de Panzer de 91 (m).

C. Resultados para LHD de 10 yd³.

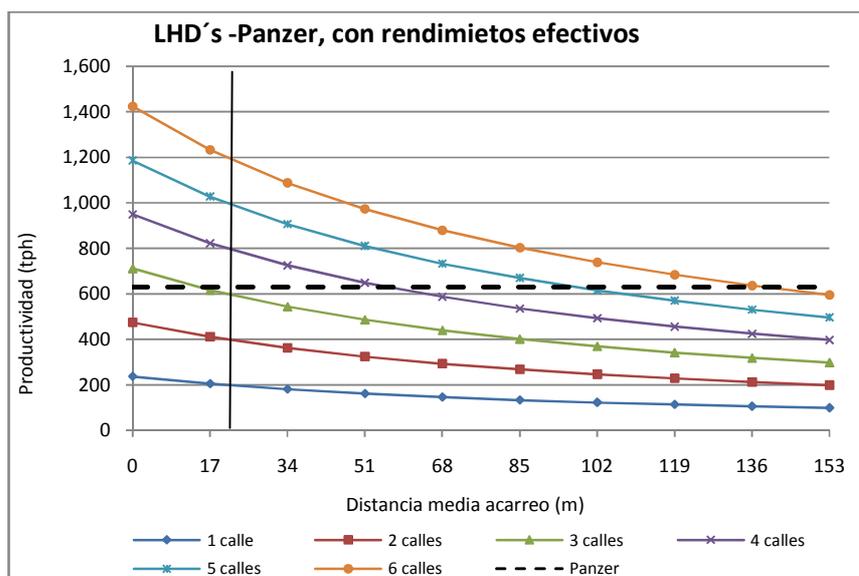


Gráfico 8: Interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd³.

Opción	Nº calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	56	105
2	5	97	135
3	6	139	165

Tabla 15: Diseños resultantes para pala 10 yd³.

	Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo de LHD (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área influencia del módulo (m ²)
10 yd ³	1	4	56	105	56	14,280
	2	5	97	135	120	23,400
	3	6	139	165	204	41,040

Tabla 16: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 10 yd³.

	Opción	N° de calles	Rendimiento Estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad de Extracción (t/m ² d)
10 yd ³	1	4	432	700	15,120	1.06
	2	5	346	700	15,120	0.65
	3	6	288	700	15,120	0.37

Tabla 17: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 10 yd³.

El diseño que maximiza el rendimiento de las palas LHD de 10 yd³ y la productividad por área hundida es la opción 1 con 432 (tph) y 1,06 (t/m²d) respectivamente. El diseño está compuesto por 4 calles de extracción de 112 metros de largo, con 56 puntos de extracción y un largo de Panzer de 105 (m).

D. Resultados para LHD de 13 yd³.

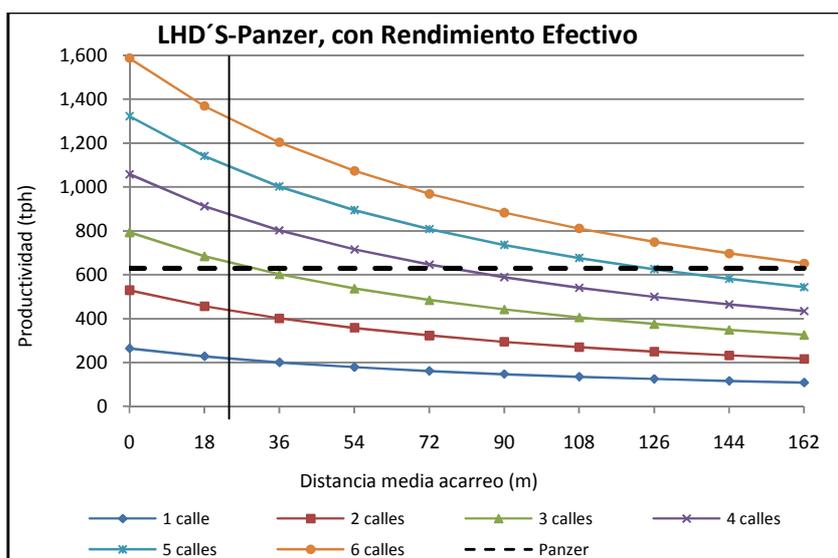


Gráfico 9: Interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd³.

Opción	N° calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	3	29	85
2	4	77	119
3	5	124	153

Tabla 18: Diseños resultantes para pala 13 yd³.

	Opción	N° de calles	Distancia media acarreo de LHD (m)	Largo Panzer (m)	N° puntos extracción	Área influencia del módulo (m ²)
13 yd ³	1	3	29	85	24	7,560
	2	4	77	119	72	20,160
	3	5	124	153	140	37,800

Tabla 19: Evaluación geométrica de los diseños para LHD de 13 yd³.

	Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad de Extracción (t/m ² d)
13 yd ³	1	576	700	15.120	2,00
	2	432	700	15.120	0,75
	3	346	700	15.120	0,40

Tabla 20: Evaluación productiva de los diseños para LHD de 13 yd³.

El diseño que maximiza el rendimiento de las palas LHD de 13 yd³ y la productividad por área hundida es la opción 1 con 576 (tph) y 2,0 (t/m²d) respectivamente. El diseño está compuesto por 3 calles de extracción de 58 metros de largo, con 24 puntos de extracción y un largo de Panzer de 85 (m).

Como resumen final se tiene una tabla con los parámetros de entrada considerados en el ejercicio, y otra con los resultados de los diseños óptimos buscados.

<i>Parámetros de entrada (input)</i>	<i>Unidad</i>	<i>Pala 4 yd3</i>	<i>Pala 7 yd3</i>	<i>Pala 10 yd3</i>	<i>Pala 13 yd3</i>
Diseño malla de extracción	m x m	12 x 15	13 x 16	15 x 17	17 x 18
Productividad panzer	tph	700	700	700	700
U _{LHD}	%	45	45	45	45
D _{feedeF}	%	90	90	90	90
D _{Panzer}	%	90	90	90	90

Tabla 21: Parámetros de entrada considerados para los diseños óptimos.

Pala LHD	Diseño geométrico				Productividad	
	Nº de calles	Largo Calles (m)	Largo Panzer (m)	Área Módulo (m ²)	Rendimiento LHD (tph)	Velocidad de Extracción (t/m ² d)
4 yd3	No existe diseño que cumpla largo límite de Panzer					
7 yd3	4	50	91	6.656	432	2,3
10 yd3	4	112	105	11.520	432	1,1
13 yd3	3	58	85	7.560	576	2,0

Tabla 22: Resumen de los diseños óptimos.

Si bien los resultados obtenidos no son comparables entre palas de distinta capacidad, se puede observar que el rendimiento de la pala en tph de 13 yd³ es superior en un 30% con respecto a la pala de 7 yd³. Sin embargo la velocidad de extracción es inferior en un 15%, ya que la pala de 13 yd³ posee un diseño de malla de extracción más

espaciado, teniendo una mayor área de influencia del módulo (respecto a palas de menor tamaño).

Al observar los gráficos anteriores de rendimientos de palas y Panzer, los diseños más productivos son los de menor número de calles y menor distancia de acarreo de las palas. Al minimizar la distancia de acarreo de las palas, lo que se está haciendo es transferir la tarea de acarreo al equipo Panzer, por lo que se traduce en un mayor rendimiento de la pala.

Para todos los diseños, el equipo Panzer impone la limitación de tratamiento máximo de minerales. Por lo que todos los módulos de los diseños obtenidos están condicionados a cumplir un tonelaje de 15.120 (tpd), considerando que dentro de la disponibilidad, el Panzer está operando continuamente con mineral.

Con respecto a la productividad por área hundida, se llegan a valores por sobre la barrera tradicional de 0,6 (t/m²d).

Algunas distancias medias de acarreo usado en la minería tradicional van entre 60 a 90 (m), operado por un equipo LHD de 7 yd³. Si consideramos la capacidad de balde del equipo y buscamos entre los resultados obtenidos del Gráfico 7, hay una opción con 54 (m) de distancia media entre punto de carguío y de vaciado. Esta opción posee un diseño con 5 cruzados de producción y según el diseño de malla considerado, se requiere un Panzer de 117 (m). Este diseño cuenta con 70 puntos de extracción con un área activa de 14.560 (m²), logrando una tasa de extracción de 1,04 (t/m²d) y un rendimiento de pala de 346 (tph) para una producción diaria de 15.120 (tpd) (ver Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14). Mediante benchmarking realizado, algunos valores de tasa de extracción varían entre 0,2 a 0,54 en estado régimen. Por lo que si se compara con los resultados de los nuevos diseños, se puede decir que se puede mejorar la productividad, pero considerando los parámetros operacionales usados aquí.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Hasta el momento no ha habido un intento en relacionar los equipos LHD a los equipos Panzer mediante un pique corto, pero de gran diámetro. La metodología que se propone busca de alguna forma resolver este problema con la finalidad de saturar al equipo Panzer para así maximizar la productividad por módulo. Como resultado, se pueden obtener diversas opciones de diseño las que se caracterizan por tener un número determinado de calles de extracción con su respectiva pala LHD operando y el largo de estas calles. Estos resultados permiten estimar, bajo ciertas condiciones y consideraciones de parámetros de operación de los LHD, el rendimiento de estos equipos de carguío. Además, con la configuración geométrica del diseño es posible determinar el área activa y la velocidad de extracción.

Sin duda el limitante es el equipo de acarreo Panzer, tanto por su rendimiento (700 tph), como también de su largo máximo permitido por el proveedor hasta hoy en día (120 metros). Pero, se obtuvieron, bajo consideraciones y supuestos tomados, rendimiento de palas sobre 400 tph y velocidades de extracción por sobre 1,0 (t/m²d), siendo el máximo valor de 2,3 (t/m²d) para el caso de la pala de 7 yd³. Pero hay que tener en cuenta que aquí no se considera ni el sistema de reducción ni el sistema de transporte principal, y dado el nivel de ingeniería aplicado en este trabajo, no se puede asegurar tales rendimientos.

No se consideraron interferencias operacionales en el nivel de acarreo, factor que podría interferir en las operaciones normales del equipo Panzer y LHD, mermando su productividad diaria, lo que disminuiría en la tasa de extracción.

CAPÍTULO 5

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DISEÑOS

5.1 INTRODUCCIÓN

El costo de operación es un tema fundamental a la hora de seleccionar una u otra alternativa de manejo de minerales. Si bien este trabajo está focalizado en determinar diseños que maximicen rendimientos y productividad por área hundida, en este capítulo se hacen los supuestos y consideraciones necesarias para estimar un costo de operación del sistema de manejo de minerales que se propone, considerando desde la extracción hasta el acarreo del mineral. En este trabajo no se analizará el costo de desarrollo ni el de preparación.

Un estudio de análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros de entrada permite caracterizar la variabilidad de los resultados obtenidos anteriormente de los diseños y productividades. Por tal motivo, otro objetivo de este capítulo es ver la sensibilidad de los resultados obtenidos en el capítulo 4 en función de algunos de los parámetros de entrada, como la utilización de LHD, la disponibilidad de los equipos alimentador estacionario y Panzer, y del rendimiento del transportador Panzer.

5.2 ESTIMACIÓN DE COSTO PROMEDIO DE OPERACIÓN

Se consideran los siguientes equipos e infraestructura para la estimación del costo de operación del sistema de manejo de minerales propuesto.

- Equipos LHD en el nivel de extracción;
- Martillo Picador, ubicados en el nivel de producción;
- Parrilla para controlar la granulometría de entrada al pique;

- Pique de traspaso;
- Alimentador estacionario (ejemplo Pate Feeder), en el nivel de acarreo; y
- Equipo de transporte Panzer, en el nivel de acarreo.

Para el caso de los equipos LHD, el costo de operación contempla los siguientes ítems:

Costo de operación de LHD (US/h)		
Costo de combustible (US\$/h)	Costo Neumático (US\$/h)	Costo Mantenimiento y Reparación (MyR) (US\$/h)

Tabla 23: Consideraciones para estimación de costo operación para LHD.

No se consideró el costo por concepto de mano de obra (M.O.).

Mediante un benchmarking se obtuvieron valores de los costos que se menciona en la tabla. El consumo de combustible y el costo de MyR están en función del tamaño del equipo LHD, y el costo de neumático se supone constante. Luego, los valores de costos para los equipos LHD son:

Capacidad LHD (yd ³)	Consumo Combustible (lt/h)	Costo Operación (US\$/h)			
		Combustible	Neumático	Mantenimiento	Total
4	18,8	7,3	10,6	9,4	27,3
7	32,0	12,4	10,6	16,4	39,4
10	44,5	17,4	10,6	23,4	51,4
13	58,0	22,5	10,6	30,4	63,5

Tabla 24: Costos de operación de palas LHD, provenientes de benchmarking.

El costo por consumo de combustible considera un precio de combustible de 0,388 US\$/lt.

El resumen de los costos de operación para el sistema de manejo de minerales propuesto se detalla a continuación.

Equipo	LHD 4 yd3	LHD 7 yd3	LHD 10 yd3	LHD 13 yd3	Unidad
Costo LHD	27,3	39,4	51,4	63,5	US\$/h
Costo martillo fijo	0,06	0,06	0,06	0,06	US\$/t
Costo parrilla/brocal	0,047	0,047	0,047	0,047	US\$/t
Costo pique	0,056	0,056	0,056	0,056	US\$/t
Costo Plate feeder	0,132	0,132	0,132	0,132	US\$/t
Costo Panzer	0,01	0,01	0,01	0,01	US\$/t

Tabla 25: Resumen costo de operación por pala LHD.

Se considera en este caso como alimentador estacionario un Plate Feeder (PF), porque se contó con dicha información.

Todos los costos están en US\$/t a excepción del costo de LHD que está en US\$/h. Como en el trabajo se habla de módulo, compuesto por un conjunto determinado de LHD, se considera lo siguiente para el cálculo del costo en US\$/t.

$$\text{Costo Operación (US$/t)} = \frac{(\text{N}^\circ \text{ LHD}) \times \text{Costo Operación (US$/h)}}{\text{Rendimiento efect. módulo (tph)}}$$

Ecuación 9: Fórmula para cálculo de costo de operación de palas.

Considerando los diseños finales obtenidos en el capítulo 4, el diseño geométrico, productividad y costo de operación para cada capacidad de pala LHD se muestra en la tabla siguiente.

Pala LHD	Diseño geométrico				Productividad		Costo Operación del módulo (US\$/t)
	Nº de calles	Largo Calles (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m²)	Rendimiento LHD (tph)	Velocidad Extracción (t/m²d)	
4 yd3	No existe diseño que cumpla largo límite de Panzer						
7 yd3	4	50	91	6.656	432	2,3	1,44
10 yd3	4	112	105	14.280	432	1,1	1,52
13 yd3	3	58	85	7.560	576	2,0	1,20

Tabla 26: Resultados completo de diseños óptimos.

Existe un estudio de un sistema de manejo de minerales muy similar al sistema propuesto en este trabajo. La única diferencia radica en que posee un sistema de acarreo mediante camiones de bajo perfil. En tal estudio realizan una comparación entre

distintas alternativas de vaciado hacia el camión, siendo los evaluados: Plate Feeder, Buzón y LHD 13 yd³. Si bien estos sistemas no son comparables con el sistema de LHD y Panzer para llegar a una conclusión, es interesante conocer el rango o magnitud de los valores de costo de operación entre distintas alternativas.

El sistema mencionado anteriormente considera los siguientes costos para determinar el costo de operación de cada alternativa.

Equipo LHD 7 yd ³
Martillo picador
Pique traspaso
Equipo Plate Feeder o Buzón o LHD 13 yd ³
Camión de 80 t

Tabla 27: Consideraciones de otro sistema de manejo de minerales.

El costo de operación para cada alternativa se expresa en forma resumida en la siguiente tabla.

Concepto	Unidad	Opciones unidades de carguío del camión		
		Plate Feeder	Buzón	LHD 13 yd ³
Costo de operación	US\$/t	1,12	1,07	1,09

Tabla 28: Evaluación de costo de operación para distintas alternativas de carguío a camión.

En este caso, considera el costo de un solo equipo LHD de 7 yd³ que opera en el nivel de extracción y se emplearon los mismos valores de costo en ítem similar.

Ahora, considerando la opción de 7 yd³ para un sistema LHD-Panzer, hay que determinar el costo de operación considerando solo un cruzado de producción, al igual que en el otro sistema. El resultado se obtuvo mediante los siguientes supuestos:

- La producción efectiva del módulo se reparte en forma equitativa entre las calles que se relacionan al Panzer. Luego, considerando las 4 calles, cada una tendrá una productividad de 158 (tph efectiva);
- Los valores de los otros costos se mantienen igual.

<i>Concepto</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Costo LHD 7 yd3	0.25	US\$/t
Costo Martillo	0.06	US\$/t
Costo Parrilla/brocal	0.047	US\$/t
Costo pique	0.056	US\$/t
Costo Plate feeder	0.132	US\$/t
Costo Panzer	0.01	US\$/t
TOTAL	0.55	US\$/t

Tabla 29: Estimación de costo de operación LHD-Panzer para un cruzado de producción.

Se puede ver que el costo de operación mediante Panzer es muy por debajo de los costos de operación obtenidos de otras alternativas. Pero, como se mencionó antes, no es posible concluir definitivamente dado el alcance del trabajo actual.

5.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DISEÑOS

Se hará un análisis de sensibilidad en base a los diseños óptimos obtenidos en el capítulo 4, en función de algunos parámetros de entrada como la utilización de los LHD, disponibilidad de equipos alimentador estacionario y Panzer, y del rendimiento del Panzer. La condición base será según los resultados que se muestra la tabla 5-5. Lo que no cambia en ningún caso es el diseño de malla de extracción propuesto anteriormente.

En forma explicativa se muestra las tácticas para llevar a cabo este estudio de sensibilidad de los resultados obtenidos.

Táctica 1: Aumento de disponibilidad de elementos de transporte (Panzer y feeder).

	1	2	3
U _{LHD} =45% R _{Panzer} =700 tph Diseño Malla de Extracción	D _{Panzer} =70% D _{feeder} =70%	D _{Panzer} =80% D _{feeder} =80%	D _{Panzer} =95% D _{feeder} =95%

Tabla 30: Táctica 1 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.

Táctica 2: Aumento de utilización de los equipos LHD's.

	1	2	3	4
$D_{Panzer}=90\%$ $D_{feeder}=90\%$ $R_{Panzer}=700$ tph Diseño Malla de Extracción	$U_{LHD}=35\%$	$U_{LHD}=40\%$	$U_{LHD}=50\%$	$U_{LHD}=55\%$

Tabla 31: Táctica 2 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.

Táctica 3: Aumento de la capacidad productiva del equipo Panzer.

	1	2
$U_{LHD}=45\%$ $D_{Panzer}=90\%$ - $D_{feeder}=90\%$ Diseño Malla de Extracción	$R_{Panzer}=400$ tph	$R_{Panzer}=1000$ tph

Tabla 32: Táctica 3 para realizar el análisis de sensibilidad de los diseños.

5.3.1 Resultados de la táctica 1:

A continuación se muestran los resultados y se analiza para cada capacidad de pala LHD. En el caso particular de la pala de 4 yd³ no hubo diseño que cumpliera el largo máximo permitido para un equipo Panzer hasta ahora. En Anexo D se encuentran todos los resultados del proceso de la metodología propuesta en este trabajo para obtener los resultados que aquí se muestran.

a) Pala LHD de 7yd³:

Capacidad LHD	7	yd ³
U_{LHD}	45	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	13 x 16	m x m

Tabla 33: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 7 yd³.

	N° de calles	Distancia media (m)	Área módulo (m ²)	Productividad módulo (tpd)	Rendimiento LHD (tph)	Velocidad extracción (t/m ² d)	Costo Operación (US\$/t)
D _{feeder} =70% D _{Panzer} =70%	5	21	6.240	11.760	444	1,9	1,89
D _{feeder} =80% D _{Panzer} =80%	5	38	10.400	13.440	389	1,3	1,84
D _{feeder} =95% D _{Panzer} =95%	4	31	6.656	15.960	409	2,4	1,78
Caso base	4	25	6.656	15.120	432	2,3	1,44

Tabla 34: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 7 yd³.

La condición de disponibilidad de los equipos panzer y feeder que maximiza el rendimiento de LHD y velocidad de extracción, y minimiza el costo de operación es el caso base con 90%. El diseño óptimo consta de 4 calles de extracción de 50 (m) de longitud cada una, con un Panzer de 91 (m) de largo.

El cálculo del área de influencia se considera las áreas de influencias generadas por cada uno de los puntos de extracción de la calle. Si se mantiene el área de influencia del módulo y el rendimiento de la pala disminuye, ¿Por qué aumenta levemente la velocidad de extracción? El aumento de la disponibilidad de los equipo de acarreo permite aumentar la utilización de los equipos LHD. Por lo tanto, más tiempo operando se traduce en más tonelaje por día y por ende se observa el efecto anterior.

b) Pala LHD de 10 yd³:

LHD	10	yd ³
U _{LHD}	45	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	15 x 17	m x m

Tabla 35: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 10 yd³.

	N° de Calles	Distancia Media (m)	Área Módulo (m ²)	Productividad Módulo (tpd)	Rendimiento LHD (tph)	Velocidad Extracción (t/m ² d)	Costo Operación (US\$/t)
D _{feeder} =70% D _{Panzer} =70%	No hay diseño posible						
D _{feeder} =80% D _{Panzer} =80%	4	37	10.200	13.440	486	1,3	1,56
D _{feeder} =95% D _{Panzer} =95%	3	21	4.590	15.960	546	3,5	1,13
Caso base	4	56	14.280	15.120	432	1,1	1,52

Tabla 36: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 10 yd³.

Para el caso de la pala de 10 yd³, una menor disponibilidad de los equipos de acarreo interfiere negativamente en la utilización de los LHD, por lo que es necesario relacionar más recursos (calles con LHD) al Panzer. Este efecto más las dimensiones del diseño de malla de extracción considerada, hace que se requiera un Panzer de mayor longitud, superior al límite impuesto inicialmente.

La condición que maximiza la productividad y minimiza el costo de operación es el diseño con disponibilidades de un 95% para equipos alimentadores y Panzer en el nivel de acarreo. Este diseño alcanza un rendimiento de pala 26% superior y una velocidad de extracción de 3,5 (t/m²d), 3,2 veces superior al caso base, a un costo de operación mínima 1,13 (US\$/t). Esto se debe a un menor número de calles asociados al Panzer sumado a calles más cortas, traduciéndose en un área de hundimiento 3 veces inferior al caso base, y una productividad máxima diaria superior.

c) Pala LHD de 13 yd³:

LHD	13	yd ³
U _{LHD}	45	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	17 x 18	m x m

Tabla 37: Condiciones de los parámetros de entrada para pala 10 yd³.

	N° de calles	Distancia Media (m)	Área Módulo (m ²)	Productividad Módulo (tpd)	Rendimiento LHD (tph)	Velocidad Extracción (t/m ² d)	Costo Operación (US\$/t)
D _{feeder} =70% D _{Panzer} =70%	4	35	9.792	11.760	556	1,2	1,71
D _{feeder} =80% D _{Panzer} =80%	4	56	17.136	13.440	486	0,8	1,64
D _{feeder} =95% D _{Panzer} =95%	3	37	9.180	15.960	546	1,7	1,18
Caso base	3	29	7344	15.120	576	2,0	1,20

Tabla 38: Resultado de análisis de sensibilidad en función de la disponibilidad para LHD 13 yd³.

La condición de disponibilidad de los equipos en el nivel de acarreo que maximiza el rendimiento de las palas y velocidad de extracción es con 90%, que corresponde al caso base. Esto se logra con un costo de operación mínimo.

Como resumen se tiene la siguiente tabla con los parámetros que maximiza la productividad, minimizando el costo de operación del módulo.

LHD	Parámetros de diseño y operación					Resultados		
	Diseño malla Extracción (m x m)	U _{LHD} (%)	D _{Panzer} (%)	D _{feeder} (%)	Rendimiento Panzer (tph)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad Extracción (t/m ² d)	Costo operación módulo (US\$/t)
7 yd ³	13 x 16	45	90	90	700	432	2,3	1,44
10 yd ³	15 x 17	45	95	95	700	546	3,5	1,13
13 yd ³	17 x 18	45	90	90	700	576	2,0	1,20

Tabla 39: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 1.

Del resumen se observa que los diseños óptimos se obtienen con disponibilidades altas de los equipos alimentadores estacionarios y Panzer (sobre 90%).

5.3.2 Resultados de la táctica 2:

El resultado del análisis según la táctica 2 son los que muestran las siguientes tablas.

a) Pala LHD 4 yd³:

LHD	4	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	12 x 15	m x m

Tabla 40: Condiciones de parámetros para pala 4 yd³ con táctica 2.

U _{LHD}	N° de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Área Módulo (m ²)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad Extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
35%	7	25	156	10.080	317	1,5	2,38
40%	6	24	132	8.640	324	1,8	2,04
45%	6	34	132	10.800	288	1,4	2,04
50%	5	27	108	7.200	311	2,1	1,70
55%	5	36	108	9.000	283	1,7	1,70

Tabla 41: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 4 yd³.

Opciones de diseño con utilización de LHD entre 35 y 45% no hay por el largo del equipo Panzer.

En este caso, al descartar las 3 primeras opciones, el diseño que optimiza la productividad y costo es la que se obtiene con una utilización de LHD de 50%, con un rendimiento de pala y velocidad de extracción de 311 (tph) y 2,1 (t/m²d) respectivamente.

b) Pala LHD 7 yd³:

LHD	7	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	13 x 16	m x m

Tabla 42: Condiciones de parámetros para pala 7 yd³ con táctica 2.

U _{LHD}	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área Módulo (m ²)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad Extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
35%	5	21	117	6.240	444	2,4	1,80
40%	5	38	117	10.400	389	1,5	1,80
45%	4	25	91	6.656	432	2,3	1,44
50%	4	38	91	8.320	389	1,8	1,44
55%	4	51	91	11.648	354	1,3	1,44

Tabla 43: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 7 yd³.

Como todos los diseños están condicionados a producir 15.120 tpd como máximo (630 tph efectiva), el costo de operación de un módulo dependerá de la cantidad de recursos involucrados en el módulo. Luego, diseños con menor número de calles poseen menores costos de operación.

La utilización del equipo LHD que maximiza el rendimiento de pala y velocidad de extracción es 35%, pero con un mayor costo de operación. No hay mayores diferencias con respecto a la productividad (3% para rendimiento de pala y 4% con respecto a la tasa de extracción). Sin embargo, en el costo de operación, el caso base (45%) es 20% menos costoso. Por tales motivo, se opta por el diseño obtenido con una utilización de palas LHD de 45%.

c) Pala LHD 10 yd³:

LHD	10	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	15 x 17	m x m

Tabla 44: Condiciones de parámetros para pala 10 yd³ con táctica 2.

U _{LHD}	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad Extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
35%	5	51	135	17.850	444	0,9	1,89
40%	4	37	105	10.200	486	1,5	1,52
45%	4	56	105	14.280	432	1,1	1,52
50%	3	28	75	6.120	519	2,5	1,14
55%	3	42	75	7.650	471	2,0	1,14

Tabla 45: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 10 yd³.

En el caso de las palas de 10 yd³, el parámetro de utilización que maximiza la productividad, tanto de la pala como del área hundida, y que minimiza el costo de operación es de 50%. Si se compara con el caso base (45%), las calles son más cortas (mitad del caso base) y posee menos calles, por lo que tiene un área mucho menor.

d) Pala LHD 13 yd³:

LHD	13	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	700	tph
Diseño malla	17 x 18	m x m

Tabla 46: Condiciones de parámetros para pala 13 yd³ con táctica 2.

U _{LHD}	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Rendimiento requerido de LHD (tph)	Velocidad Extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
35%	4	35	119	9.792	556	1,5	1,59
40%	4	56	119	17.136	486	0,9	1,59
45%	3	29	85	7.344	576	2,0	1,20
50%	3	45	85	11.016	519	1,4	1,20
55%	3	61	85	12.852	471	1,2	1,20

Tabla 47: Resultado de análisis de la táctica 2 para LHD 13 yd³.

El diseño óptimo para la pala de 13 yd³ se obtiene mediante una utilización de 45% (caso base). Este diseño maximiza la productividad de la pala y la tasa de extracción, y minimiza el costo de operación.

Como resumen final del análisis de sensibilidad de los diseños en función de la utilización del equipo LHD para cada capacidad de pala se muestra en la siguiente tabla resumen.

LHD	Parámetros de diseño y operacional					Resultados		
	Diseño malla Extracción (m x m)	U _{LHD} (%)	D _{Panzer} (%)	D _{feeder} (%)	Rendimiento Panzer (tph)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad Extracción (t/m ² d)	Costo operación módulo (US\$/t)
4 yd ³	12 x 15	50	90	90	700	311	2,1	1,70
7 yd ³	13 x 16	45	90	90	700	432	2,3	1,44
10 yd ³	15 x 17	50	90	90	700	519	2,5	1,14
13 yd ³	17 x 18	45	90	90	700	576	2,0	1,20

Tabla 48: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 2.

5.3.3 Resultados de la táctica 3:

a) Pala LHD 4 yd³:

LHD	4	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
U _{LHD}	45	%
Diseño malla	12 x 15	m x m

Tabla 49: Condiciones de parámetros para pala 4 yd³ con táctica 3.

Rendimiento Panzer (tph)	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Productividad módulo (tpd)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
400	3	22	60	3.240	8.640	329	2,7	1,12
Caso Base	6	34	132	10.800	15.120	288	1,4	2,04
1,000	8	28	180	11.520	21.600	309	1,9	2,61

Tabla 50: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 4 yd³.

Solo hay un diseño que cumple el límite del largo del equipo Panzer. Esto ocurre cuando el rendimiento de Panzer es de 400 (tph), además coincide con el diseño que optimiza tanto la productividad de la pala y área hundida, como el costo de operación.

b) Pala LHD 7 yd³:

LHD	7	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
U _{LHD}	45	%
Diseño malla	13 x 16	m x m

Tabla 51: Condiciones de parámetros para pala 7 yd³ con táctica 3.

Rendimiento Panzer (tph)	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Productividad módulo (tpd)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
400	3	61	65	9.984	8.640	329	0,9	1,22
Caso Base	4	25	91	6.656	15.120	432	2,3	1,44
1,000	6	31	143	9.984	21.600	412	2,2	2,04

Tabla 52: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 7 yd³.

El caso base (700 tph) optimiza el rendimiento de pala y velocidad de extracción. Pero presenta un costo de operación levemente mayor, en 15%, con respecto al costo menor (1,22 US\$/t).

c) Pala LHD 10 yd³:

LHD	10	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
U _{LHD}	45	%
Diseño malla	15 x 17	m x m

Tabla 53: Condiciones de parámetros para pala 10 yd³ con táctica 3.

Rendimiento Panzer (tph)	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Productividad módulo (tpd)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
400	2	35	45	5.100	8.640	494	1,7	0,89
Caso Base	4	56	105	14.280	15.120	432	1,1	1,52
1,000	5	35	135	12.750	21.600	494	1,7	1,77

Tabla 54: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 10 yd³.

En este caso ocurre una situación muy particular. Hay dos opciones de diseño que maximiza la productividad de los equipos LHD y del área hundida, pero con diferencia notable en el rendimiento del equipo Panzer. Éstos son con 400 y 1000 tph de rendimiento del transportador de cadenas. Sin embargo, el primero posee un menor costo de operación (70% menos con respecto al caso base), pero posee menor flexibilidad de operación debido a que el diseño contempla la relación de dos calles de extracción a un Panzer. Este caso se produce porque al haber menos exigencia de productividad,

debido a la capacidad del equipo de acarreo, se requieren menor cantidad de cruzados de extracción relacionados a éste. Por tal motivo, hay una menor área hundida y un menor costo de operación del módulo debido a una menor cantidad de recursos asociados.

d) Pala LHD 13 yd³:

LHD	13	yd ³
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
U _{LHD}	45	%
Diseño malla	17 x 18	m x m

Tabla 55: Condiciones de parámetros para pala 13 yd³ con táctica 3.

Rendimiento Panzer (tph)	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)	Productividad módulo (tpd)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad extracción (m ²)	Costo Operación (US\$/t)
400	2	53	51	7.344	8.640	494	1,2	0,95
Caso Base	3	29	85	7.344	15.120	576	2,1	1,20
1,000	4	20	119	7.344	21.600	617	2,9	1,47

Tabla 56: Resultado de análisis de la táctica 3 para LHD 13 yd³

En el caso de las palas de 13 yd³, la condición que maximiza el rendimiento de las palas y la velocidad de extracción es con una productividad de Panzer de 1000 (tph), alcanzando resultados de 617 (tph) y 2,9 (t/m²d) respectivamente. Pero este diseño posee un mayor costo de operación con respecto a los demás, 23% superior con respecto al caso base (700 tph).

En general, se puede observar que a mayor rendimiento del equipo Panzer, mayor es el número de calles relacionadas a éste. Esta tendencia ocurre cuando se busca saturar al equipo de acarreo.

A modo de resumen se tiene la siguiente tabla con los parámetros que maximizan la productividad de los equipos LHD y del área hundida en función del rendimiento del equipo Panzer.

LHD	Parámetros de diseño y operacional					Resultados		
	Diseño malla Extracción (m x m)	U _{LHD} (%)	D _{Panzer} (%)	D _{feeder} (%)	Rendimiento Panzer (tph)	Rendimiento estimado LHD (tph)	Velocidad extracción (t/m ² d)	Costo operación módulo (US\$/t)
4 yd ³	12 x 15	45	90	90	400	329	2,7	1,12
7 yd ³	13 x 16	45	90	90	700	432	2,3	1,44
10 yd ³	15 x 17	45	90	90	1000	494	1,7	1,77
13 yd ³	17 x 18	45	90	90	1000	617	2,9	1,47

Tabla 57: Resumen de resultados de análisis mediante táctica 3.

De este análisis se observa que la capacidad de la pala LHD tiene relación con la productividad del equipo Panzer. Para palas de menor tamaño (4 yd³), se optimiza con Panzer de menor productividad (400 tph), mientras que para la palas de mayor tamaño (10 y 13 yd³), se obtienen diseños óptimos con rendimiento del Panzer mayores (1000 tph).

Finalmente, se obtuvieron las condiciones finales de operación que maximizan la productividad del equipo LHD y del área hundida, obteniendo para ello sus respectivos diseños geométricos. Éstos resultados finales del análisis se muestran a continuación.

Equipo	Condiciones de Operación				Diseño Geométrico			Productividad		Costo
LHD	U _{LHD} (%)	D _{Panzer} (%)	D _{feeder} (%)	R _{Panzer} (tph)	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	R _{LHD} (tph)	Velocidad Extracción (t/m ² d)	Costo Operación (US\$/t)
4 yd ³	45	90	90	400	3	22	60	329	2,7	1,12
7 yd ³	45	90	90	700	4	25	91	432	2,3	1,44
10 yd ³	45	95	95	700	3	21	75	546	3,5	1,13
13 yd ³	45	90	90	1000	4	20	119	617	2,9	1,47

Tabla 58: Resumen final diseños óptimos.

Según el rango de análisis realizado en este trabajo, las condiciones de operación de utilización de las palas LHD es de 45% para todo los diseños de las distintas palas.

Disponibilidades de los equipos alimentador estacionario y Panzer deben ser 90% excepto para la pala de 10 yd³, con 95%. El rendimiento del Panzer tiene una relación directa con el tamaño de la pala LHD.

Con respecto al diseño geométrico, el número de calles varía entre 3 y 4, relacionados a un Panzer, con distancia media de acarreo de palas LHD cortas, en torno a los 20 (m). Esto permite un rendimiento de palas LHD entre 330 y 617 tph, dependiendo de la capacidad de éstas. Se obtienen velocidades de extracción sobre 2,0 (t/m²d), mientras que el costo de operación está en torno a la media de 1,29 (US\$/t).

5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Debido a los alcances impuestos inicialmente en este trabajo, no es posible hacer una comparación directa con un sistema de manejo de minerales tradicional.

Con respecto al análisis de sensibilidad realizado en función de algunos parámetros de operación tales como utilización de equipos LHD, la disponibilidad de alimentadores estacionarios y Panzer, y el rendimiento del equipo Panzer permitieron determinar condiciones que responden a los objetivos impuestos en un comienzo, que es maximizar la productividad de las palas LHD y del área hundida. Se puede ver caso en que diseños con igual número de calles, pero con distinta distancia media poseen igual área de módulo. Esto se debe porque el área del módulo considera el área de influencia de los puntos de extracción y no está en función de la longitud de la calle. Es decir, el área del módulo depende del número de puntos de extracción, y éste a su vez es función del diseño de la malla (espaciamiento entre puntos).

El costo de operación de un módulo depende principalmente de la cantidad de recursos involucrados y de la productividad esperada de dicho módulo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La revisión bibliográfica realizada en este trabajo, indica que hasta ahora no existen sistemas de manejo de minerales en block caving que haya conjugado equipos discretos como LHD, con equipos continuos como Panzer. Existen sistemas con el uso de un Plate Feeder y chancado, como ocurre en Diablo Regimiento y Reserva Norte.

Para poder evaluar un sistema de manejo de minerales compuesto por LHD- Martillo picador- Alimentador estacionario-Panzer fue necesario desarrollar una metodología que permita, a nivel de perfil, relacionar el nivel de producción con el nivel de acarreo de minerales. En base a esta metodología, fue posible diseñar geoméricamente el sistema en estudio, permitiendo poder evaluar el rendimiento de las palas LHD, la productividad por área hundida y el costo de operación del módulo (una vez construido).

Mediante un análisis de sensibilidad de los diseños en función de parámetros como el índice de operación de los equipos y el rendimiento del equipo Panzer, fue posible llegar a resultados con diseños finales que optimizan la función objetivo del trabajo. Estos resultados muestran un rendimiento de LHD superior a 300 (tph), con velocidad de extracción superior a 2,0 (t/m²d), superando los valores manejados en la minería tradicional.

Todos los diseños estudiados consideran un solo Panzer en el nivel de acarreo. Esto es muy poco flexible operacionalmente puesto que una eventual falla del equipo causaría una pérdida operacional aguas arriba. Luego, es importante estudiar alternativas que pueda mejorar la flexibilidad del diseño.

Es posible aumentar el rendimiento medio de las palas LHD acortando la distancia media de acarreo entre punto de extracción y punto de vaciado. Luego, lo que se sugiere mediante este trabajo es traspasar, en parte, la labor de acarreo de mineral a equipos fabricados para tales fines como el Panzer, aprovechando así las capacidades productivas de los equipos LHD. Es por eso que los diseños óptimos obtenidos sugieren una distancia media no superior a los 25 (m), considerando un mínimo de 20 (m). Es importante determinar la distancia o largo mínimo que requiere una pala LHD para una operación normal.

En el trabajo de memoria realizado se muestran diseños con distancias medias muy cortas, que bordean los 50 (m). Esto es porque el objetivo del trabajo era buscar maximizar rendimiento de palas LHD y la velocidad de extracción de un área activa. Según la revisión bibliográfica del estado del arte de los sistemas de carguío y transporte, las distancias de acarreo de las palas LHD superan los 50 (m), llegando en algunos casos por sobre los 150 (m). Mediante la metodología propuesta para diseñar un sistema de manejo de minerales con LHD y Panzer, es posible obtener diseños bajo la restricción de una distancia media en particular. Pero existe una relación entre el largo de la calle y el largo del Panzer. Esto es que mientras más larga sean la calles, menor será el rendimiento de la palas LHD, y por ende se necesitarán más calles por Panzer, para así saturar a éste último. Esto implica un Panzer cada vez más largo y hasta hoy en día existe un límite de acarreo.

Si bien, se obtuvieron resultados llamativos para el rendimiento de las palas LHD y la velocidad de extracción, se sugiere evaluar y desarrollar este tema en etapas siguientes de ingeniería de perfil.

También se hacen las siguientes recomendaciones:

- Hacer un análisis de los diseños mediante la herramienta de la simulación, incorporando todas las interferencias posibles ;

- Hacer una evaluación económica en término de costo de preparación e inversiones por unidad de área; y
- Considerar en el diseño el sistema de transporte desde el Panzer hasta superficie para luego poder compara el sistema propuesto con otro usado tradicionalmente en la minería de block caving.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Arancibia E. y Lara F. 2009. Evaluación Económica de Aplicación de Minería Continua en Chuquicamata Subterráneo. 174 p.
2. Arancibia E., Carrasco F., Fuentes S., Guarda J. 2008. Design of Extraction Layout for the Chuquicamata Underground Mine Project. Proceedings of Massmin 2008. pp 3-14.
3. Arce Pino Juan Carlos. 2002. Dimensionamiento de distancias entre puntos de extracción y niveles de producción y socavación para método panel caving en roca primaria mina El Teniente. Chile, Universidad de Santiago.
4. Arrisueño R., Javier 2002. Estudio sobre la velocidad de extracción en una mina de block caving. Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 176p.
5. Bartlett P.J. y Croll A. 2000. Cave Mining at Premier Diamond Mine. Proceedings of MassMin 2000. pp 227
6. Brown E.T., 2003. Block Caving Geomechanics, second edition. JKMR The University of Queensland.
7. Bullock R. y Hustrulid W. 2001. Planning the Underground Mine on the Basis of Mining Method, Underground Mining Methods. pp 29-48.
8. Caldor K., Townsend P. y Russell F. 2000. The Palabora Underground Mine Project. Proceedings of MassMin 2000. pp.219-.
9. Carrasco J., Francisco. 2002. Uso de equipo de carbón en minería metálica. Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 117p.
10. Callahan, M., Keskimaki, K. y Fronapfel, L. 2008. Constructing and Operating Henderson's new 7210 Production Level. Proceedings of Massmin 2008. pp 15-24.
11. Chacón, J. (1976) "Block caving y LHD: ¿Compatibles?", Revista Minerales N° 134, Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCH), pp. 3-18.

12. Chacón, J. (1980), "Block Caving y LHD, Reflexiones sobre mallas de extracción", pp. 415-428.
13. Chacón J., Göpfert H., Ovalle A. 2004. Thirty Years Evolution of Block Caving in Chile. Proceedings of MassMin 2004. pp 387-392.
14. Continuous Mining Trial N°2- Chain Report, Bucyrus [s.a.]
15. Cornejo C., Marco. 2008. Impacto en la Productividad del Nivel de Traspaso en la Confiabilidad de de un Programa de Producción. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 130p.
16. Duffield, S. 2000. Design of the Second Block Cave at northparkes E26 Mine. Proceedings of Massmine 2000. pp 335-346.
17. El Teniente, Plan de Negocios y Desarrollo 2008, Informe Final, Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, Codelco Chile-División El Teniente, Diciembre 2007.
18. Hustrulid, W. "Underground Mining Methods Handbook".
19. Hustrulid W., Sun Ch. y Mustoe G. 2004. Some Remarks on Ore Pass Design Guidelines. Proceedings MassMin 2004. pp 301-308.
20. IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2004. Estudio de Minería Continua en Salvador, Informe Final. Santiago, Chile. 85p.
21. IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2006a. Validación del Transportador Continuo. Ingeniería básica Proyecto Prueba II Minería Continua. Santiago, Chile. 23p.
22. IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2006b. Informe Final-Ingeniería Prueba II, Anexo J: Validación Transportador Continuo. Santiago, Chile. 17p.
23. IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2006c. Aportes de valor de tecnologías para roca primaria Anexo 1. En su: Diseño y planificación de minas explotadas por hundimiento con tecnología emergentes. Informe Final Santiago, Chile. 75p.
24. IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2006d. Sistema de transporte continuo. Protocolo de prueba, Santiago, Chile. 18p.

25. Lara M., Fernando. 2008. Diseño del Nivel de Producción para un Módulo Genérico de Minería Continua. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 152p.
26. Le-feaux, Cortés. [199-]. Manejo de materiales en explotaciones subterráneas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 98p
27. Paredes L., Raúl. 1986. Estudio preliminar para la explotación por block caving del área sur del Segundo Panel mina Río Blanco- División Andina Codelco Chile. Chile. Memoria, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile.
28. Nicola Escobar E., Fishwick Tapia M. 2000. An Underground Air Blast- Codelco Chile- División Salvador. Proceedings of Massmin 2000. pp.278-288.
29. Ross, I. 2008. Northparkes E26 Lift 2 Block Cave- A case study. Proceedings of Massmin 2008. pp 25-34.
30. Rubio E. 2006. Cátedra de Diplomado en Minería: Design and Planning of Block Caving Operations. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
31. Stevens R. M. y Acuña Arnoldo. 1982. Loading-Haul-Dump Units. Underground Mining Method Handbook.
32. Sweigard, Richard J. 1992 Materials Handling: Loading and Haulage, SME Mining Engineering Handbook, second edition.
33. Troncoso, Sebastián. 2006. Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción. Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
34. Tyler, W. Keskimaki, K. y Stewart D. 2004. The New Henderson Mine Truck Haulage System- The Last Step to a Totally Trackless Mine. Proceedings of Massmin 2004. pp 317-323.
35. Wattimena, R. K. 2003. Designing Undercut and Production Level Drifts of Block Caving Mines. PhD Thesis. JKMRRC School of Engineering The University of Queensland. Chapters 1, 2 y 3.

Para poder ocupar el ábaco de Laubscher, es necesario contar con la información de la calidad del macizo rocoso. Pero como aquí no se tiene tal información, se tomará como supuesto lo siguiente:

- Las palas LHD de capacidad 4 y 7 (yd³) operarán en zonas de roca mixta, es decir, con una clase del macizo rocoso de 3;
- Las palas LHD de capacidad 10 y 13 (yd³) operarán en zonas de roca primaria, con fragmentación gruesa. Es decir, de clase 2.

El ancho de la galería queda definido por el ancho máximo del equipo, más medio metro a ambos lado como mínimo, por seguridad por ley (artículo 368 del código de minería). La altura de la galería queda definida por la altura máxima del equipo más un metro, siendo medio metro lo mínimo. Luego, se tiene la siguiente tabla con ancho y alto de la galería para cada modelo o capacidad de LHD. Para este ejercicio se usó modelos estándares de LHD de la marca Sandvik.

Modelo LHD	Balde LHD			Equipo LHD			Galería	
	Capacidad Pala (yd ³)	Capacidad Pala (m ³)	Ancho balde (mm)	Largo equipo (mm)	Ancho máximo (mm)	Alto equipo (mm)	Ancho libre de galería (m)	Alto libre de galería (m)
Toro 6/6M	4	3,1	2.100	8.631	2.230	2.200	3,3	3,2
Toro 7/7M	7	5,4	2.550	9.680	2.550	2.395	3,6	3,4
toro 0010	10	7,6	3.000	11.120	3.000	2.750	4,0	3,8
Toro 11	13	9,9	3.300	11.993	3.100	2.950	4,3	4,0

Tabla 59: Dimensiones de equipo LHD y de galerías de producción.

Con el ancho de galería y la clase del macizo rocoso, junto al ábaco de Laubscher, se puede determinar el espaciamiento mínimo y máximo entre puntos de extracción de la malla, para cada equipo LHD en particular, obteniéndose así el diseño teórico de la malla de extracción. La operativización quedará definida por el largo de la estocada, que dependerá principalmente por el largo de cada equipo y la proyección del talud de mineral del punto de extracción. La tabla que sigue muestra el resultado del cálculo del largo de estocada para cada capacidad de pala, en base a la figura 4-8 y la ecuación 4-1.

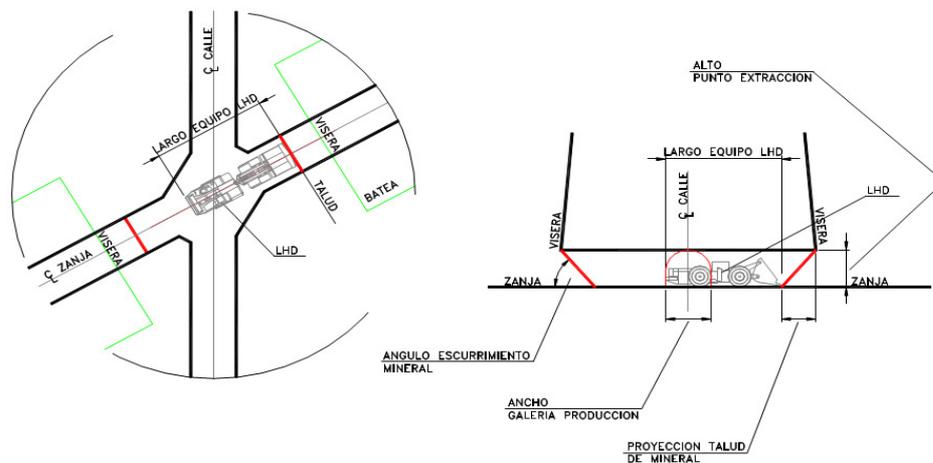


Figura 23: Vista en planta de cruzado producción y vista perfil de estocada (Sandvik).

Para determinar la longitud de la galería de zanja mínima que necesita cada equipo LHD se utiliza la siguiente fórmula (Arce JC., 2002).

$$L_z = L_{eq} + L_{talud} - A_c / \text{sen}(60^\circ)$$

Ecuación 10: Vista en planta de cruzado

Donde:

L_z : Largo de galería zanja que requiere el LHD;

L_{eq} : Largo del equipo LHD;

L_{talud} : Largo del talud de mineral en el punto de extracción;

A_c : Ancho de la calle de producción,

Capacidad pala (yd ³)	Largo equipo (m)	Proyección talud (m)	Largo estocada (m)
4	8,6	3,2	8,0
7	9,7	3,4	9,2
10	11,1	3,8	10,6
13	12,0	4,0	11,4

Tabla 60: Largo de estocada de carguío

El dimensionamiento de la malla de extracción queda definido con: la distancia entre calles perpendicular a las calles, la distancia entre zanjas paralela a las calles y el ángulo entre calle/zanja, que en este caso corresponde a 60°. Determinado el diseño de la

malla de extracción a utilizar, se realiza el proceso de operativización, el cual consiste en rediseñar la malla de extracción, considerando la geometría del equipo LHD a usar.

Finalmente, se obtuvieron los siguientes diseños de mallas para cada LHD respectivamente:

Modelo LHD	Capacidad balde (yd3)	Diseño teórico (m x m)	Diseño operativizado (m x m)
Toro 6/6M	4	9,2 x 15	12 x 15
Toro 7/7M	7	9,5 x 16	13 x 16
Toro 0010	10	11 x 17	15 x 17
Toro 11	13	11 x 18	17 x 18

Tabla 61: Diseños de mallas para cada capacidad de LHD.

Los diseños de la malla de extracción pueden variar de acuerdo a las condiciones de cada mina. Los valores obtenidos aquí no representan los definitivos, sino que son un input para determinar los diseños que se busca.

Anexo B: Estimación de rendimiento de los equipos.

B.1 Equipos LHD:

Mediante un benchmarking se obtuvieron datos del tiempo de carga y descarga para las palas de 7, 9 y 11 yd³. Los valores para las palas de 4, 10 y 13 yd³ se obtienen de la ecuación de regresión hecha a cada curva. Para la curva de tiempo de carga corresponde una regresión polinómica, mientras que para el tiempo de descarga corresponde una lineal. Esto se puede ver en el siguiente gráfico.

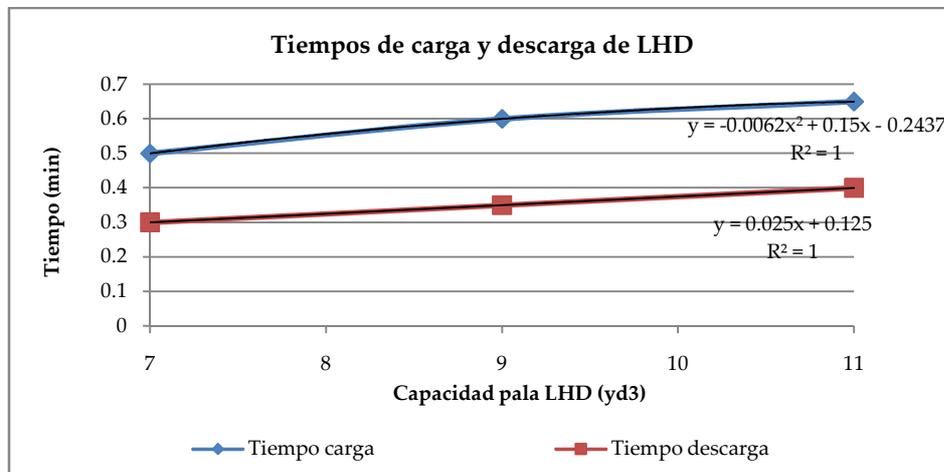


Gráfico 10: Curvas de tiempo de carga y descarga para LHD de 7, 9 y 11 yd³.

Los valores obtenidos se muestran en la tabla que sigue.

Capacidad LHD	(yd ³)	4	7	10	13
Tiempo carga	(min)	0.3	0.5	0.6	0.7
Tiempo descarga	(min)	0.2	0.3	0.4	0.5

Tabla 62: Estimación de tiempo de carga y descarga para LHD.

Con los valores de la tabla anterior y otras consideraciones se tiene la siguiente tabla con los parámetros para estimar el rendimiento de las palas LHD.

	Pala	yd3	4	7	10	13
Cb	capacidad balde	m3	3,1	5,4	7,6	9,9
d	densidad	t/m3	2,65	2,65	2,65	2,65
e	esponjamiento	%	40	40	40	40
Fll	factor llenado	%	90	90	90	90
Di	distancia viaje cargado	m	-	-	-	-
Vc	velocidad cargado	m/h	7.150	7.500	7.400	6.400
Dv	distancia viaje vacio	m	-	-	-	-
Vv	velocidad vacio	m/h	21.000	21.500	21.500	19.850
T1	tiempo carga	min	0,3	0,5	0,6	0,7
T2	tiempo descarga	min	0,2	0,3	0,4	0,5
T3	tiempo viaje total	min	-	-	-	-
T4	Tiempo de maniobra	min	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabla 63: Parámetros para estimación rendimiento de LHD.

Se hicieron algunos supuestos para algunos valores de la tabla anterior. Estos se mencionan a continuación.

- Los valores de densidad media in situ de la roca, esponjamiento y factor de llenado son valores estándares y son tradicionalmente utilizados para proyectos.
- Las velocidades con el balde cargado será un promedio entre las velocidades de la 1° y 2° marcha. Mientras que las velocidades con el balde vacío será un promedio entre las velocidades de la 3° y 4° marcha, datos provenientes del catálogo de Sandvik. En la tabla 4-5 se indican las velocidades por marcha para cada capacidad de pala.

Modelo LHD	Cap. Pala (yd3)	Velocidad de avance y retroceso			
		1er cambio (km/h)	2do cambio (km/h)	3er cambio (km/h)	4to cambio (km/h)
Toro 6/6M	4	4.8	9.5	16	26
Toro 7/7M	7	5.4	9.6	16	27
toro 0010	10	5.4	9.4	16	27
Toro 11	13	4.6	8.2	14.2	25.5

Tabla 64: Datos de velocidades de palas Sandvik.

- Se supuso un tiempo de pérdida por cada ciclo, debido a las maniobras realizadas por el operador en cada ciclo productivo. Si bien este tiempo depende de la experiencia del operador y del tipo de pala, se supuso un tiempo estándar de 0,2 (min) o 12 (s) por cada ciclo.

La capacidad productiva de una calle, cuando se independiza de las restricciones posibles de encontrar para el sistema de traspaso y transporte aguas abajo, depende directamente del largo de calle (o distancia entre piques), la capacidad del balde del LHD y la velocidad de este mismo.

Para el cálculo de la productividad nominal del LHD, se emplearon la Ecuación 2 y Ecuación 3, del capítulo 3. Hay que tener en cuenta que los equipos LHD funcionan mediante un tiempo de ciclo, puesto que son equipos discretos. Y el tiempo de ciclo depende mayoritariamente de la distancia de acarreo que deberá realizar el equipo desde el punto de extracción hasta el punto de vaciado.

A continuación, se muestra los resultado obtenidos para la estimación de los rendimientos nominales de las distintas palas LHD, en toneladas por hora.

LHD 4 yd ³												
	Unidad	Valor										
Distancia media	m	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
N° de ciclos por hora	ciclo/h	86	69	58	50	44	39	35	32	29	27	25
Rendimiento	tph	447	360	301	259	227	203	183	166	152	141	131

Tabla 65: Estimación de rendimiento de LHD de 4 yd³.

LHD 7 yd ³												
	Unidad	Valor										
Distancia media	m	0	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160
N° de ciclos por hora	ciclo/h	60	51	45	40	35	32	29	27	25	23	22
Rendimiento	tph	547	466	407	360	324	294	269	248	230	214	201

Tabla 66: Rendimiento pala 7 yd³.

Pala 10 yd³

	Unidad	Valor									
Distancia media	m	0	17	34	51	68	85	102	119	136	153
N° de ciclos por hora	ciclo/h	50	43	38	34	31	28	26	24	22	21
Rendimiento	tph	651	564	498	445	403	368	338	313	291	273

Tabla 67: Rendimiento pala 10 yd³.

Pala 13 yd³

	Unidad	Valor									
Distancia media	m	0	18	36	54	72	90	108	126	144	162
N° de ciclos por hora	ciclo/h	43	37	32	29	26	24	22	20	19	18
Rendimiento	tph	726	626	550	491	443	404	371	343	319	298

Tabla 68: Rendimiento pala 13 yd³.

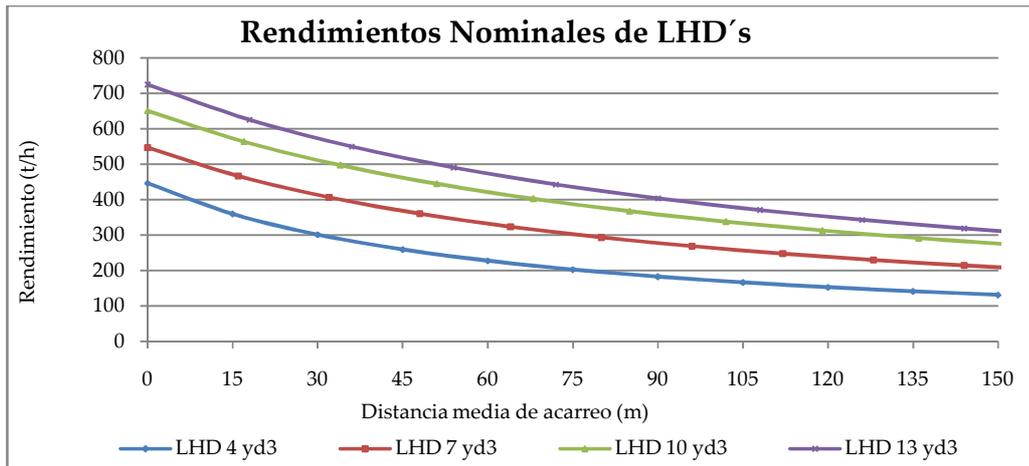


Gráfico 11: Rendimiento nominal LHD's.

Anexo C: Estimación de la utilización de los equipos LHD.

El valor de la utilización de LHD puede variar de acuerdo a las condiciones operacionales, política y gestión de control para enfrentar las distintas interferencias operacionales que posea cada faena.

En forma resumida se tiene la siguiente tabla con el tiempo promedio de operación y de pérdidas debido a las interferencias totales. La información está dividida en turno y en zona de muestreo.

Horas Operativas	Turno	A	B	C	Promedio
	Zona Oeste	2,43	3,11	2,93	2,82
	Zona Centro	3,5	3,93	3,75	3,72
	Zona Este	2,37	3,89	3,67	3,31
	Promedio	2,76	3,64	3,45	

Promedio horas operativas totales	3,30
Promedio horas pérdidas totales	4,69

Tabla 69: Promedio tiempo operativo y pérdidas.

Producto de las interferencias, los equipos operan un promedio de 3,3 (h/turno), correspondiente al 41% de un turno de 8 horas. Esto equivale al tiempo en que las palas permanecen en su ciclo productivo para un sistema de transporte compuesto por trenes. En otras palabras, la utilización promedio de los equipos LHD en el nivel de extracción sería de 41%.

La interferencia debido a pique lleno se debe a que no se tienen recurso para vaciar el mineral en el nivel de transporte. Es decir, habría una descoordinación entre ambos niveles productivos. Esto quiere decir que la cantidad de entrada de material al pique, desde el nivel de producción, es mayor al de la salida en el nivel de transporte. También se debería por problemas en los buzones de descarga, por lo que el pique no podría vaciar, llenándose hasta el máximo.

Como en el sistema de manejo de minerales que se estudia considera un Panzer, que es un equipo continuo, se supone que se evitará pérdida de tiempo por pique lleno. Por ende, se descartan aquellas interferencias tales como: pique lleno, revisión pique, problemas Op, chequeo pique, cambio pique.

Mediante un benchmark, se pudo obtener valores promedio del porcentaje de pérdida de tiempo por pique lleno. Estos valores se muestran a continuación.

Zona	% pérdida	Tiempo Promedio (min)
Oeste	5,10%	24,5
Centro	4,29%	20,6
Este	3,87%	18,6

Tabla 70: Promedio pérdida de tiempo debido a pique lleno.

El tiempo promedio total de la interferencia, correspondiente a pique lleno, es de 4,4%, como indica el trabajo de estudio de tiempos realizado por Esmeralda. Este valor, en promedio para las 3 zonas, corresponde a 2,2 minutos por turno.

Las otras interferencias que no se consideran para el nuevo sistema de manejo de minerales, tales como revisión de pique, problema OP, cambio de pique y chequeo de pique a pie, corresponden un promedio general de 0,0276 (h) por turno. Esto equivale a 0,35% del tiempo total de un turno.

Luego, al descontar el promedio de tiempo de interferencias mencionadas anteriormente, se estima que el tiempo promedio total por interferencia para el nuevo sistema propuesto es de 4,38 (h), lo que equivale a decir que solo 3,62 (h) de un turno de 8 (h) las palas LHD se encuentra en operación. Por tal motivo, la utilización efectiva promedio del equipo LHD se estima en un 45%. Este valor no incluye la interferencia causada por la falta de disponibilidad del equipo alimentador en el nivel de acarreo (salida del pique de traspaso), ni tampoco la del equipo Panzer.

A continuación se explican todas las interferencias operacionales sobre la pala LHD que logró identificar en el benchmarking.

Interferencia	Definición
Inicio de turno	Compila todas las actividades necesarias para dar comienzo a la producción de un turno. Se inicia con el hito horario del comienzo de turno y termina con el inicio del movimiento de equipos LHD en la calle de producción.
Fin de turno	Se asocia a todas las actividades necesarias para dar término a las operaciones del sector. Se inicia con la detención de los equipos LHD en producción y termina con el hito horario de fin de turno.
Choca	Detención de operaciones para alimentación.
Pique lleno	Detención de operaciones de producción por no contar con capacidad de vaciado en el pique.
Martillo picando	Espera de LHD por operación de picado por parte del martillo.
Problemas con martillo	La imposibilidad de operar el martillo con normalidad detiene las operaciones de producción para su chequeo.
LHD a taller	Suspensión de la operación de un equipo LHD por traslado a taller. Llega otro a reemplazarlo.
Petróleo	Suspensión de la operación de un equipo LHD por carga de combustible.
Problemas con LHD	Detención para chequear incorrecta operación de equipo LHD.
Persona en calle	Suspensión de la operación de producción de un equipo LHD por permitir el ingreso de persona a la zona confinada.
LHD detenida	Detención de equipo por motivos distintos a las interferencias definidas en esta lista.
Personal de mantención	Detención de operaciones de equipo LHD para producción por permitir el ingreso de personal de mantención.
Rikotus	Detención de operaciones de equipo LHD para producción por ingreso de Rikotus.
Limpia calle	Equipo LHD suspende operaciones de producción por limpieza de calle.
Cachorro	Detención de operaciones de equipo LHD para producción por realización de labores de cachorro.

Luz azul o teléfono	Detención del equipo por señal para comunicarse con operador.
Entra equipo menor	Detención para permitir circulación de equipo menor.
Muestreo	Detención de la producción para realización de muestre en puntos de extracción.
Revisa pique desde pala	Equipo detiene su operación para revisar estado del pique.
Entra otro LHD	Detención de labores de producción por permitir el ingreso de otro equipo LHD a la zona confinada.
Quemada	Detención de operaciones de equipo LHD de producción por detonación de explosivos.
Cambia colpa	El equipo LHD suspende sus actividades de producción para desbloquear un punto de extracción por presencia de roca con sobre-tamaño.
Problemas con OP	Impedimento para descargar en OP.
Pinchazo	Daño en neumático de equipo LHD.
Rociadores	Detención de actividades de producción del equipo LHD por activación de rociadores.
Cambio de rieles	Reparación de rieles de punto de extracción.
Poca visibilidad	Detención de operaciones por falta de visibilidad.
LHD en otra función	Cese de operación para producción por cambio de actividad.
Chequea pique a pie	Revisión de estado del pique deteniendo el equipo LHD y bajándose de él.
Personal eléctrico	Detención de labores de producción por ingreso de personal eléctrico a la zona confinada.
Zanja colgada	Suspensión de operaciones en un punto de extracción por colgadura.
Revisa zanjas	Detención de LHD por revisión de zanja por parte del operador.
Quemada cercana	Suspensión de operaciones por encontrarse en la zona de seguridad para una quemada.
Invierte pala	Operación para invertir la posición del balde del equipo LHD.
Cambio de calle	Suspensión de actividades de producción por cambio de calle.
Operador se baja	Abandono del equipo LHD por parte del operador.
Cambio de pique	Cambio de pique en operación por imposibilidad de utilizar el asociado al punto de extracción en producción.
Cambio de cinta	Detención de producción por modificación de la zona confinada.
Relevo	Detención del equipo por relevo de operador.

Espera por saca	Detención del equipo por espera de nombrada con puntos de extracción en producción.
-----------------	---

Tabla 71: Características de las interferencias.

Los tiempos promedio de duración se muestran en la siguiente tabla.

Interferencia	Duración (hr)	% del turno	HH:MM:SS
Inicio de turno	1,3977	17,471	1:23:52
Fin de turno	1,1300	14,124	1:07:48
Choca	0,9371	11,714	0:56:14
Pique lleno	0,2778	3,472	0:16:40
Martillo picando	0,2046	2,557	0:12:17
Problemas con martillo	0,1401	1,751	0:08:24
LHD a taller	0,0880	1,100	0:05:17
Petróleo	0,0803	1,004	0:04:49
Problemas con LHD	0,0659	0,823	0:03:57
Persona en calle	0,0436	0,545	0:02:37
LHD detenida	0,0368	0,459	0:02:12
Personal de mantención	0,0333	0,417	0:02:00
Rikotus	0,0305	0,382	0:01:50
Limpia calle	0,0280	0,350	0:01:41
Cachorro	0,0233	0,292	0:01:24
Luz azul o teléfono	0,0213	0,266	0:01:17
Entra equipo menor	0,0171	0,213	0:01:02
Muestreo	0,0147	0,183	0:00:53
Revisa pique desde pala	0,0141	0,176	0:00:51
Entra otro LHD	0,0116	0,144	0:00:42
Quemada	0,0103	0,129	0:00:37
Cambia colpa	0,0100	0,125	0:00:36
Problemas con OP	0,0069	0,086	0:00:25
Pinchazo	0,0069	0,086	0:00:25
Rociadores	0,0069	0,086	0:00:25
Cambio de rieles	0,0064	0,081	0:00:23
Poca visibilidad	0,0062	0,078	0:00:22
LHD en otra función	0,0057	0,071	0:00:21
Chequea pique a pie	0,0052	0,064	0:00:19
Personal eléctrico	0,0040	0,050	0:00:14
Zanja colgada	0,0037	0,046	0:00:13
Revisa zanjas	0,0036	0,046	0:00:13
Quemada cercana	0,0036	0,044	0:00:13
Invierte pala	0,0035	0,044	0:00:13
Cambio de calle	0,0021	0,026	0:00:08
Operador se baja	0,0015	0,019	0:00:05
Cambio de pique	0,0014	0,017	0:00:05
Cambio de cinta	0,0011	0,014	0:00:04

Relevo	0,0007	0,009	0:00:03
Espera por saca	0,0001	0,002	0:00:01
Total Interferencias	4,69	58,566	4:41:12

Tabla 72: Tiempo promedio de duración de las interferencias.

A continuación, se muestra mediante gráficos circulares las pérdidas de tiempo más relevantes detectados en el benchmarking.

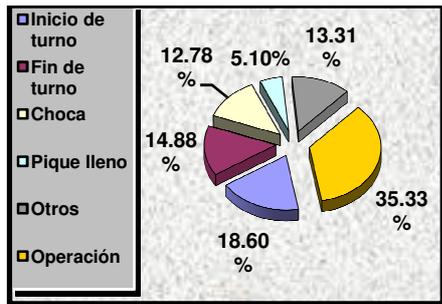


Gráfico 12: Porcentaje de interferencias Zona Oeste.

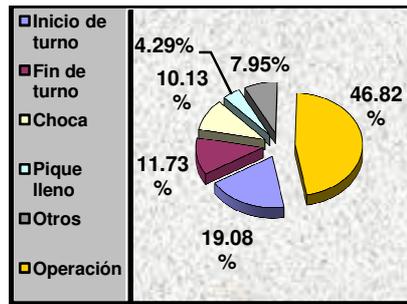


Gráfico 13: Porcentaje de interferencias Zona Centro.

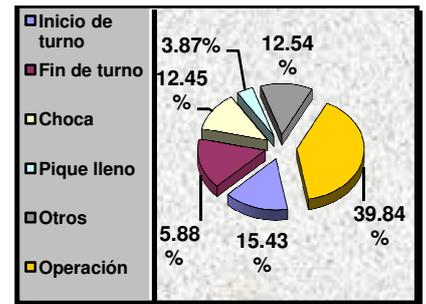


Gráfico 14: Porcentaje de interferencias Zona Este.

Anexo D: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 1.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la metodología propuesta en este trabajo para obtener diseños para un sistema LHD-Panzer.

1. Caso pala LHD 4 yd³:

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	70	%
D_{Panzer}	70	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 73: Condición de análisis para pala 4 yd³.

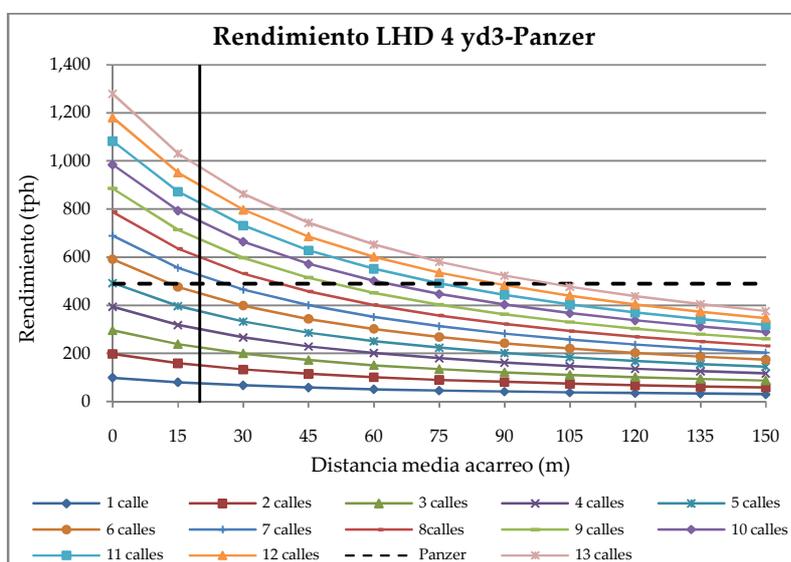


Gráfico 15: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	7	25	156
2	8	38	180
3	9	50	204
4	10	63	228
5	11	75	252
6	12	88	276
7	13	100	300

Tabla 74: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área del Módulo (m ²)
1	7	25	156	56	10,080
2	8	38	180	96	17,280
3	9	50	204	126	22,680
4	10	63	228	180	32,400
5	11	75	252	242	43,560
6	12	88	276	288	51,840
7	13	100	300	364	65,520

Tabla 75: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd³.

Opción	Rendimiento Estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	317	700	11,760	1.17
2	278	700	11,760	0.68
3	247	700	11,760	0.52
4	222	700	11,760	0.36
5	202	700	11,760	0.27
6	185	700	11,760	0.23
7	171	701	11,760	0.18

Tabla 76: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	80	%
D_{Panzer}	80	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 77: Condición de análisis para pala 4 yd³

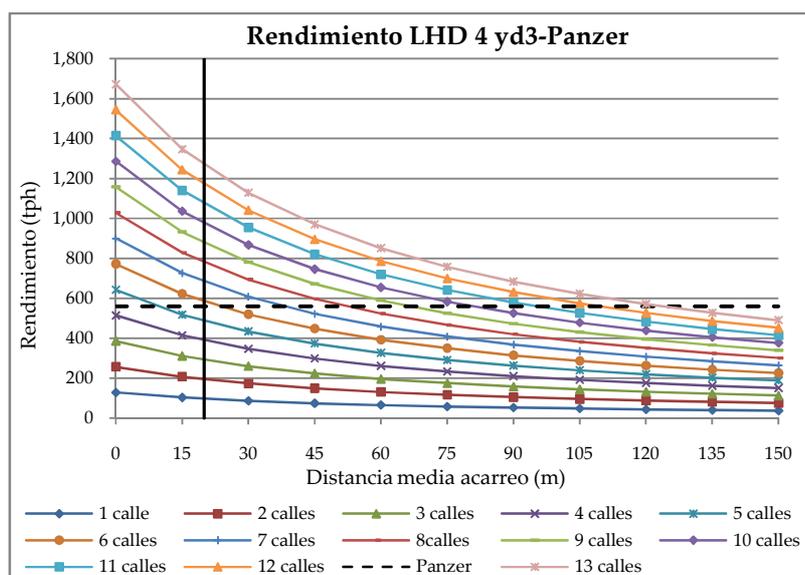


Gráfico 16: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)
1	6	24	132
2	7	38	156
3	8	52	180
4	9	66	204
5	10	81	228
6	11	95	252
7	12	109	276
8	13	124	300

Tabla 78: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área módulo (m ²)
1	6	24	132	48	8,640
2	7	38	156	84	15,120
3	8	52	180	112	20,160
4	9	66	204	162	29,160
5	10	81	228	220	39,600
6	11	95	252	286	51,480
7	12	109	276	360	64,800
8	13	124	300	442	79,560

Tabla 79: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd³.

Opción	Rendimiento Estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	324	700	13,440	1.56
2	278	700	13,440	0.89
3	243	700	13,440	0.67
4	216	700	13,440	0.46
5	194	700	13,440	0.34
6	177	700	13,440	0.26
7	162	701	13,440	0.21
8	150	702	13,440	0.17

Tabla 80: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	95	%
D_{Panzer}	95	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 81: Condición de análisis para pala 4 yd³.

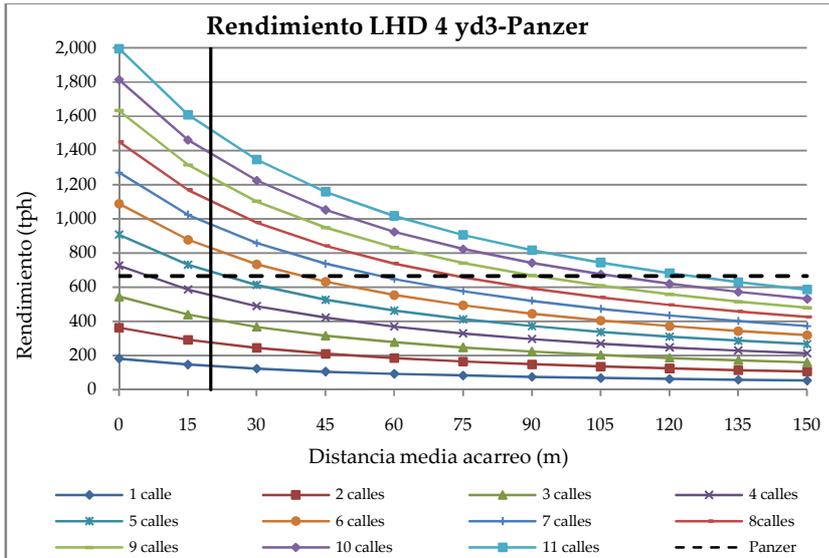


Gráfico 17: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 4 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)
1	5	23	108
2	6	40	132
3	7	57	156
4	8	74	180
5	9	91	204
6	10	107	228
7	11	124	252

Tabla 82: Resultado de opciones de diseños para LHD 4yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia Media acarreo (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área del Módulo (m ²)
1	5	23	108	40	7,200
2	6	40	132	72	12,960
3	7	57	156	112	20,160
4	8	74	180	160	28,800
5	9	91	204	234	42,120
6	10	107	228	300	54,000
7	11	124	252	374	67,320

Tabla 83: Resultados diseños geométricos para LHD 4yd³.

Opción	Rendimiento Estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
1	327	700	15,960	2.22
2	273	700	15,960	1.23
3	234	700	15,960	0.79
4	205	700	15,960	0.55
5	182	700	15,960	0.38
6	164	700	15,960	0.30
7	149	701	15,960	0.24

Tabla 84: Evaluación productiva de los diseños para LHD 4yd³.

2. Caso pala LHD 7 yd³:

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	70	%
D_{Panzer}	70	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 85: Condición de análisis para pala 7 yd³

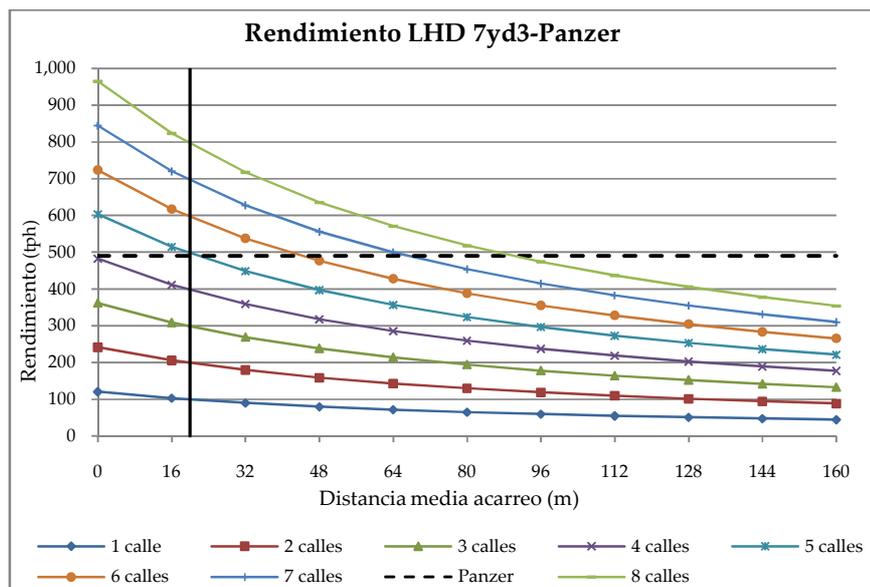


Gráfico 18: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)
1	5	21	117
2	6	44	143
3	7	67	169
4	8	90	195

Tabla 86: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia Media acarreo (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área Módulo (m ²)
1	5	21	117	30	6,240
2	6	44	143	72	14,976
3	7	67	169	126	26,208
4	8	90	195	192	39,936

Tabla 87 Resultados diseños geométricos para LHD 7yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
1	444	700	11,760	1.9
2	370	700	11,760	0.8
3	317	700	11,760	0.4
4	278	700	11,760	0.3

Tabla 88: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	80	%
D_{Panzer}	80	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 89: Condición de análisis para pala 7 yd³.

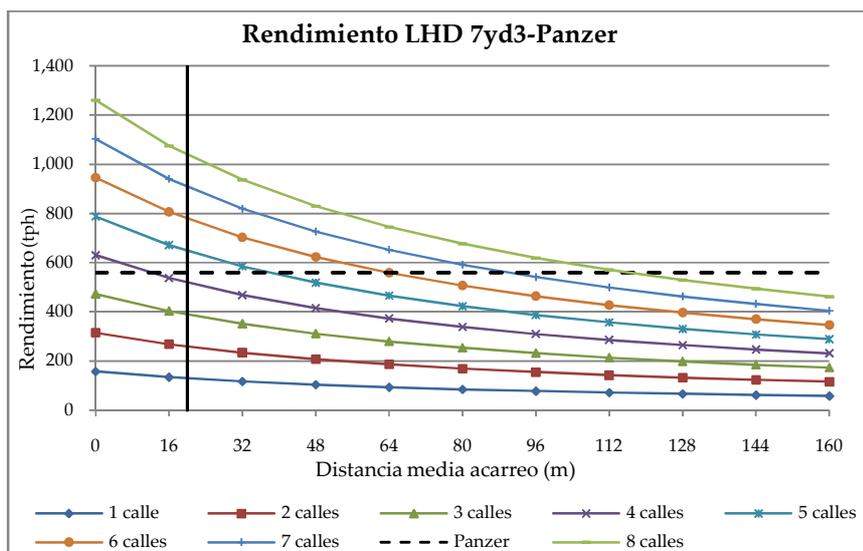


Gráfico 19: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)
1	5	38	117
2	6	64	143
3	7	90	169
4	8	116	195

Tabla 90: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área Módulo (m ²)
1	5	38	117	50	10,400
2	6	64	143	96	19,968
3	7	90	169	168	34,944
4	8	116	195	240	49,920

Tabla 91: Resultados diseños geométricos para LHD 7yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	389	700	13,440	1.3
2	324	700	13,440	0.7
3	278	700	13,440	0.4
4	243	700	13,440	0.3

Tabla 92: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	95	%
D_{Panzer}	95	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 93: Condición de análisis para pala 7 yd³

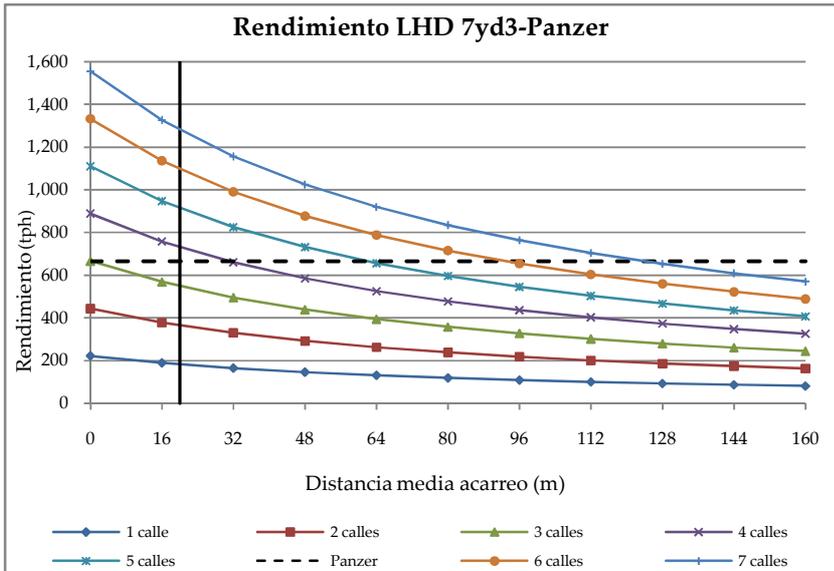


Gráfico 20: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 7 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	31	91
2	5	62	117
3	6	93	143
4	7	124	169

Tabla 94: Resultado de opciones de diseños para LHD 7yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área Módulo (m ²)
1	4	31	91	32	6,656
2	5	62	117	80	16,640
3	6	93	143	144	29,952
4	7	124	169	224	46,592

Tabla 95: Resultados diseños geométricos para LHD 7yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
1	409	700	15,960	2.40
2	327	700	15,960	0.96
3	273	700	15,960	0.53
4	234	700	15,960	0.34

Tabla 96: Evaluación productiva de los diseños para LHD 7yd³.

3. Caso pala LHD 10 yd³:

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	70	%
D_{Panzer}	70	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 97: Condición de análisis para pala 10 yd³

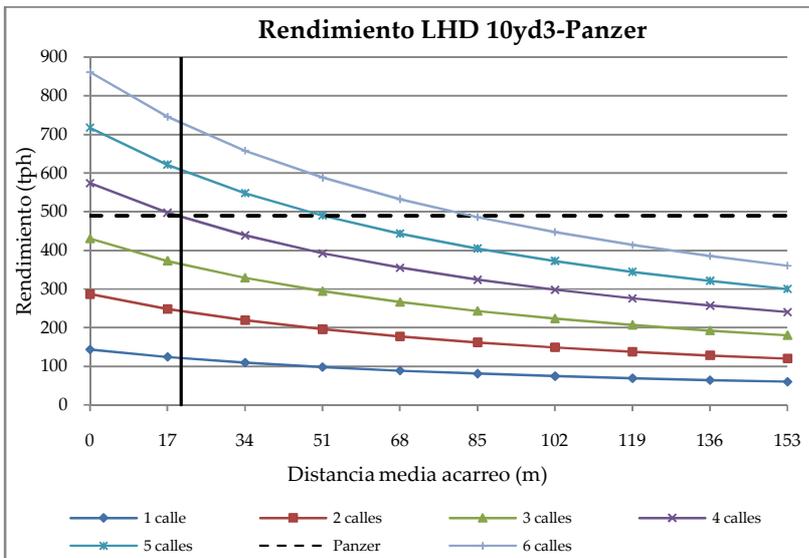


Gráfico 21: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	5	51	135
2	6	83	165

Tabla 98: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd³

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área módulo (m ²)
1	5	51	135	70	17,850
2	6	83	165	120	30,600

Tabla 99: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	444	700	11,760	0.66
2	370	700	11,760	0.38

Tabla 100: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	80	%
D_{Panzer}	80	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 101: Condición de análisis para pala 10 yd³

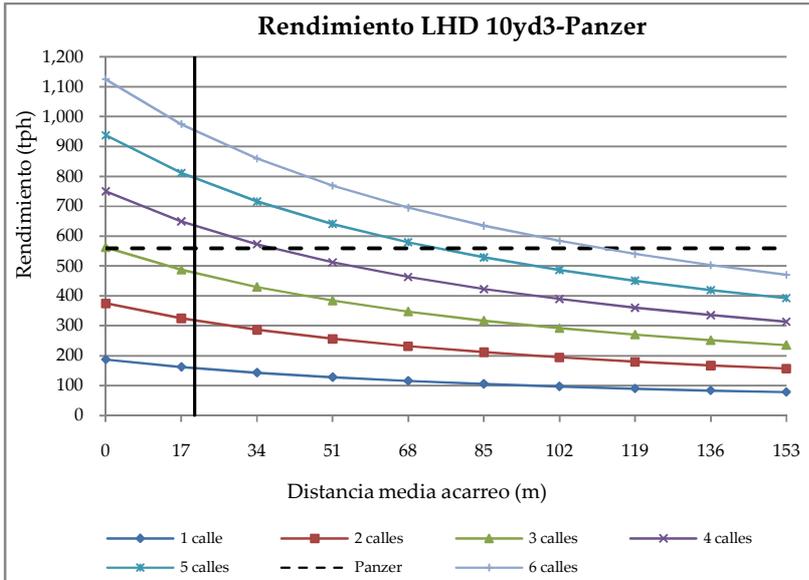


Gráfico 22: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	37	105
2	5	74	135
3	6	111	165

Tabla 102: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área Módulo (m ²)
1	4	37	105	40	10,200
2	5	74	135	90	22,950
3	6	111	165	168	42,840

Tabla 103: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	486	700	13,440	1.32
2	389	700	13,440	0.59
3	324	700	13,440	0.31

Tabla 104: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	95	%
D_{Panzer}	95	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 105: Condición de análisis para pala 10 yd³.

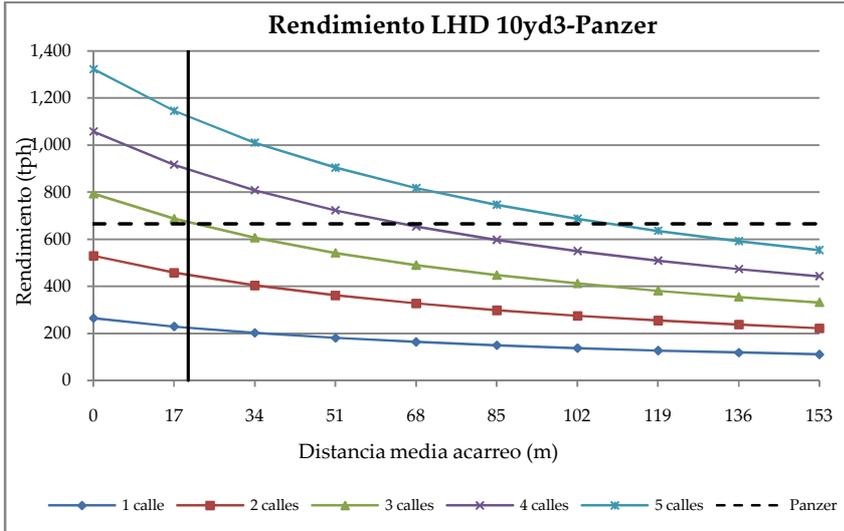


Gráfico 23: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 10 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	3	21	75
2	4	65	105
3	5	109	135

Tabla 106: Resultado de opciones de diseños para LHD 10yd³

Opción	Nº de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área módulo (m ²)
1	3	21	75	18	4,590
2	4	65	105	64	16,320
3	5	109	135	130	33,150

Tabla 107: Resultados diseños geométricos para LHD 10yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	546	700	15,960	3.48
2	409	700	15,960	0.98
3	327	700	15,960	0.48

Tabla 108: Evaluación productiva de los diseños para LHD 10yd³.

4. Caso pala LHD 13 yd³:

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	70	%
D_{Panzer}	70	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 109: Condición de análisis para pala 13 yd³

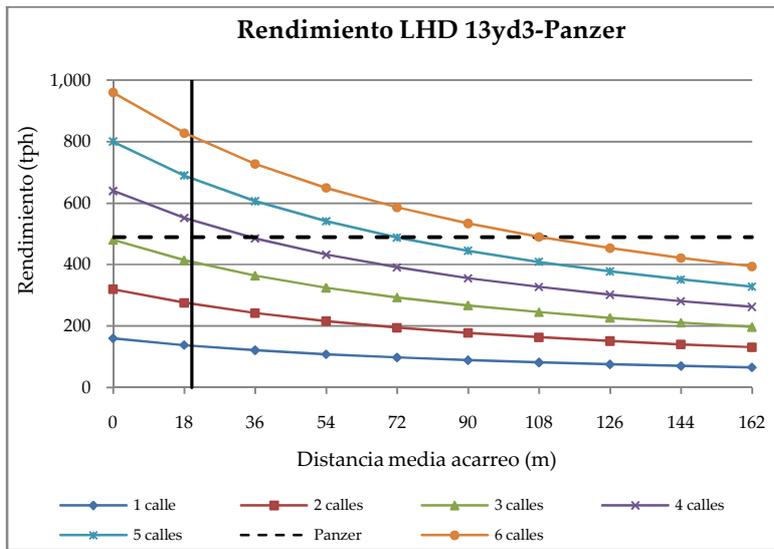


Gráfico 24: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	35	119
2	5	71	153
3	6	108	187

Tabla 110: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd³

Opción	Nº de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos Extracción	Área módulo (m ²)
1	4	35	119	32	9,792
2	5	71	153	80	24,480
3	6	108	187	156	47,736

Tabla 111: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	556	700	11,760	1.20
2	444	700	11,760	0.48
3	370	700	11,760	0.25

Tabla 112: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	80	%
D_{Panzer}	80	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 113: Condición de análisis para pala 13 yd³

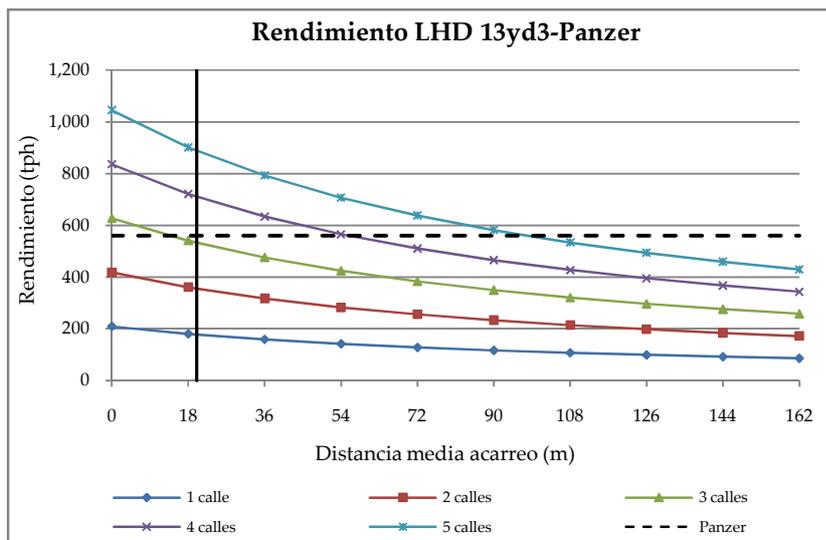


Gráfico 25: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	56	119
2	5	98	153

Tabla 114: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd³

Opción	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área Módulo (m ²)
1	4	56	119	56	17,136
2	5	98	153	110	33,660

Tabla 115: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd³.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
1	486	700	13,440	0.78
2	389	700	13,440	0.40

Tabla 116: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd³.

U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	95	%
D_{Panzer}	95	%
R_{Panzer}	700	tph

Tabla 117: Condición de análisis para pala 13 yd³

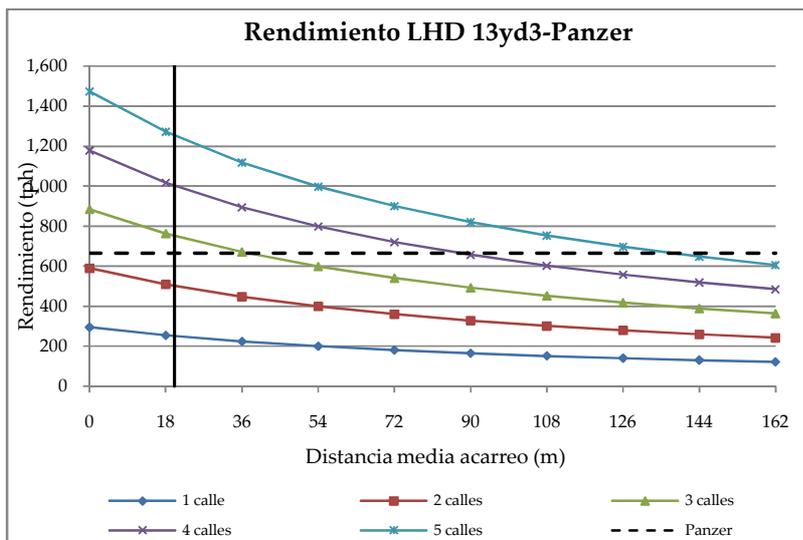


Gráfico 26: Curvas de interacción LHD's-Panzer, pala 13 yd³.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	3	37	85
2	4	87	119
3	5	137	153

Tabla 118: Resultado de opciones de diseños para LHD 13yd3

Opción	Nº de calles	Distancia Media (m)	Largo Panzer (m)	Nº puntos extracción	Área módulo (m ²)
1	3	37	85	30	9,180
2	4	87	119	80	24,480
3	5	137	153	160	48,960

Tabla 119: Resultados diseños geométricos para LHD 13yd3.

Opción	Rendimiento estimado LHD (tph)	Rendimiento Panzer (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
1	546	700	15,960	1.74
2	409	700	15,960	0.65
3	327	700	15,960	0.33

Tabla 120: Evaluación productiva de los diseños para LHD 13yd3.

Anexo E: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 2.

Los resultados de diseño obtenidos para la táctica 2 se resumen en las siguientes tablas.

1. Pala LHD 4 yd3:

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	N° de calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	9	25	204	12,960
40%	8	27	180	11,520
45%	7	25	156	10,080
50%	6	21	132	6,480
55%	6	29	132	8,640

Tabla 121: Diseño geométrico LHD 4yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	R _{panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad Módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	317	11760	0.91
40%	700	313	11760	1.02
45%	700	317	11760	1.17
50%	700	333	11760	1.81
55%	700	303	11760	1.36

Tabla 122: Evaluación productividad LHD 4yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	N° de calles	Distancia media LHD (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	8	27	180	11,520
40%	7	27	156	10,080
45%	6	24	132	8,640
50%	6	33	132	10,800
55%	5	25	108	7,200

Tabla 123: Diseño geométrico LHD 4yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	R _{panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	313	13440	1.17
40%	700	313	13440	1.33
45%	700	324	13440	1.56
50%	700	292	13440	1.24
55%	700	318	13440	1.87

Tabla 124: Evaluación productividad LHD 4yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	7	25	156	10,080
40%	6	24	132	8,640
45%	6	34	132	10,800
50%	5	27	108	7,200
55%	5	36	108	9,000

Tabla 125: Diseño geométrico LHD 4yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	R _{panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	317	15120	1.50
40%	700	324	15120	1.75
45%	700	288	15120	1.40
50%	700	311	15120	2.10
55%	700	283	15120	1.68

Tabla 126: Evaluación productividad LHD 4yd3.

2. Pala LHD 7 yd3:

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	7	32	169	11,648
40%	6	29	143	9,984
45%	5	21	117	6,240
50%	5	34	117	10,400
55%	5	47	117	12,480

Tabla 127: Diseño geométrico LHD 7yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	408	11760	1.01
40%	700	417	11760	1.18
45%	700	444	11760	1.88
50%	700	400	11760	1.13
55%	700	364	11760	0.94

Tabla 128: Evaluación productividad LHD 7yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	6	29	143	9,984
40%	5	23	117	6,240
45%	5	38	117	10,400
50%	4	23	91	4,992
55%	4	35	91	8,320

Tabla 129: Diseño geométrico LHD 7yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	417	13440	1.35
40%	700	438	13440	2.15
45%	700	389	13440	1.29
50%	700	438	13440	2.69
55%	700	398	13440	1.62

Tabla 130: Evaluación productividad LHD 7yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	5	21	117	6,240
40%	5	38	117	10,400
45%	4	25	91	6,656
50%	4	38	91	8,320
55%	4	51	91	11,648

Tabla 131: Diseño geométrico LHD 7yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	444	15120	2.42
40%	700	389	15120	1.45
45%	700	432	15120	2.27
50%	700	389	15120	1.82
55%	700	354	15120	1.30

Tabla 132: Evaluación productividad LHD 7yd3.

3. Pala LHD 10 yd3:

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	6	40	165	15,300
40%	5	33	135	10,200
45%	5	51	135	17,850
50%	4	33	105	8,160
55%	4	48	105	12,240

Tabla 133: Diseño geométrico LHD 10yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	476	11760	0.77
40%	700	500	11760	1.15
45%	700	444	11760	0.66
50%	700	500	11760	1.44
55%	700	455	11760	0.96

Tabla 134: Evaluación productividad LHD 10yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	5	33	135	10,200
40%	4	21	105	6,120
45%	4	37	105	10,200
50%	4	54	105	14,280
55%	3	25	75	4,590

Tabla 135: Diseño geométrico LHD 10yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	500	13440	1.32
40%	700	547	13440	2.20
45%	700	486	13440	1.32
50%	700	438	13440	0.94
55%	700	530	13440	2.93

Tabla 136: Evaluación productividad LHD 10yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	Nº de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	5	51	135	17,850
40%	4	37	105	10,200
45%	4	56	105	14,280
50%	3	28	75	6,120
55%	3	42	75	7,650

Tabla 137: Diseño geométrico LHD 10yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	444	15120	0.85
40%	700	486	15120	1.48
45%	700	432	15120	1.06
50%	700	519	15120	2.47
55%	700	471	15120	1.98

Tabla 138: Evaluación productividad LHD 10yd3.

4. Pala LHD 13 yd3:

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	5	30	153	12,240
40%	5	51	153	18,360
45%	4	35	119	9,792
50%	4	51	119	14,688
55%	3	22	85	5,508

Tabla 139: Diseño geométrico LHD 13yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 70%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad Extracción (t/m ² d)
35%	700	571	11760	0.96
40%	700	500	11760	0.64
45%	700	556	11760	1.20
50%	700	500	11760	0.80
55%	700	606	11760	2.14

Tabla 140: Evaluación productividad LHD 13yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	5	51	153	18,360
40%	4	37	119	12,240
45%	4	56	119	17,136
50%	3	28	85	7,344
55%	3	42	85	9,180

Tabla 141: Diseño geométrico LHD 13yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 80%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	500	13440	0.73
40%	700	547	13440	1.10
45%	700	486	13440	0.78
50%	700	583	13440	1.83
55%	700	530	13440	1.46

Tabla 142: Evaluación productividad LHD 13yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	N° de calles	Distancia media (m)	Largo Panzer (m)	Área módulo (m ²)
35%	4	35	119	9,792
40%	4	56	119	17,136
45%	3	29	85	7,344
50%	3	45	85	11,016
55%	3	61	85	12,852

Tabla 143: Diseño geométrico LHD 13yd3.

U _{LHD}	D _{feeder} = D _{Panzer} = 90%			
	R _{Panzer} (tph)	R _{LHD} (tph)	Productividad módulo (tpd)	Velocidad extracción (t/m ² d)
35%	700	556	15120	1.54
40%	700	486	15120	0.88
45%	700	576	15120	2.06
50%	700	519	15120	1.37
55%	700	471	15120	1.18

Tabla 144: Evaluación productividad LHD 13yd3.

Anexo F: Resultado de Análisis de Sensibilidad con Táctica 3.

Los resultados de diseño obtenidos para la táctica 3 se resumen en las siguientes tablas.

1. Pala LHD 4 yd³:

LHD	4	yd ³
U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	90	%
D_{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	400	tph
Diseño malla	12 x 15	m x m

Tabla 145: Condición de diseño LHD 4yd³.

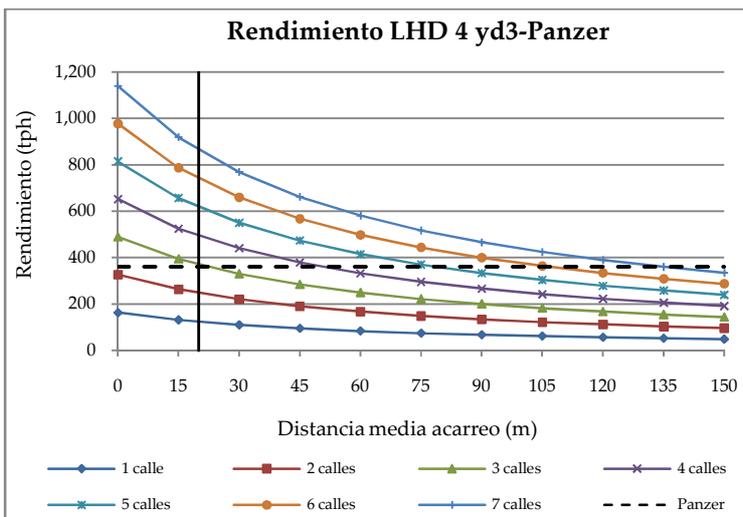


Gráfico 27: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media Acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	3	22	60
2	4	50	84
3	5	78	108
4	6	107	132
5	7	135	156

Tabla 146: Diseños geométricos

LHD	4	yd3
U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	90	%
D_{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	1000	tph
Diseño malla	12 x 15	m x m

Tabla 147: Condición de diseño LHD 4yd3.

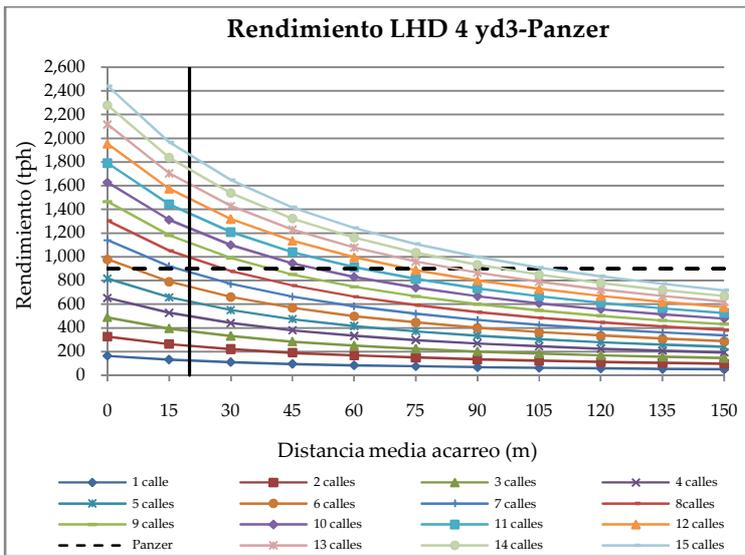


Gráfico 28: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	8	28	180
2	9	39	204
3	10	50	228
4	11	62	252
5	12	73	276
6	13	84	300
7	14	95	324
8	15	107	348

Tabla 148: Diseños geométricos

2. Pala LHD 7 yd³:

LHD	7	yd3
U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	90	%
D_{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	400	tph
Diseño malla	13 x 16	m x m

Tabla 149: Condición de diseño LHD 7yd3.

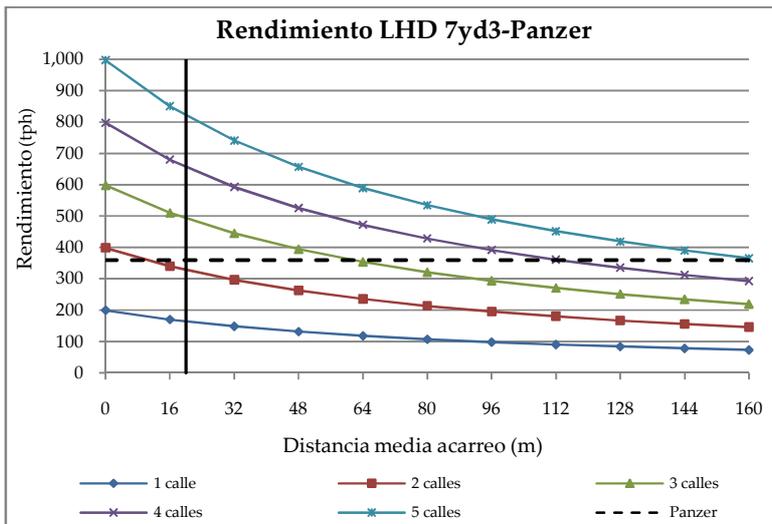


Gráfico 29: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	3	61	65
2	4	113	91
3	5	164	117

Tabla 150: Diseños geométricos

LHD	7	yd3
U _{LHD}	45	%
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	1000	tph
Diseño malla	13 x 16	m x m

Tabla 151: Condición de diseño LHD 7yd3.

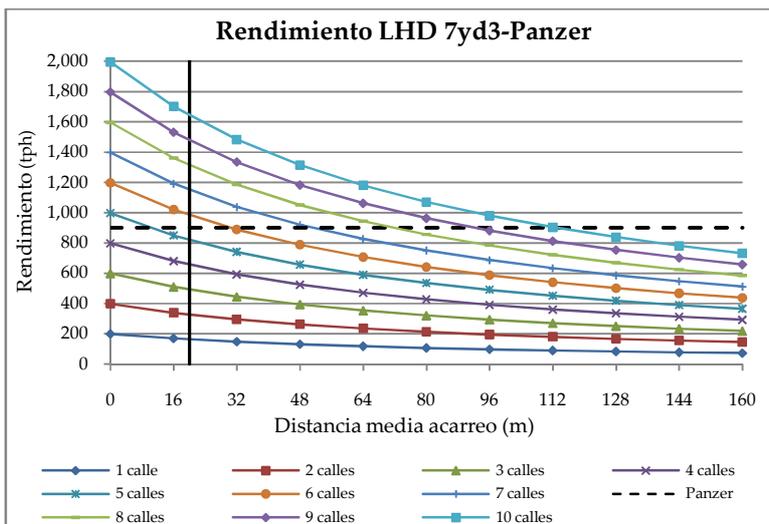


Gráfico 30: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	6	31	143
2	7	51	169
3	8	72	195
4	9	92	221
5	10	113	247

Tabla 152: Diseños geométricos

3. Pala LHD 10 yd³:

LHD	10	yd ³
U _{LHD}	45	%
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	400	tph
Diseño malla	15 x 17	m x m

Tabla 153: Condición de diseño LHD 10yd³.

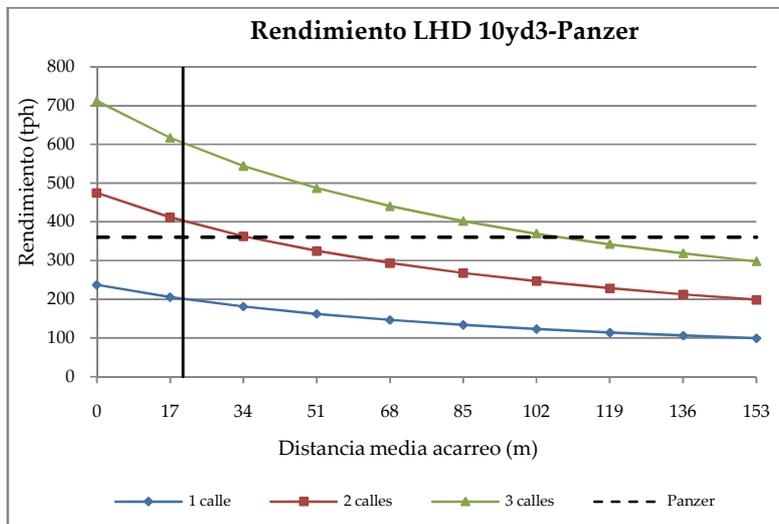


Gráfico 31: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	2	35	45
2	3	108	75

Tabla 154: Diseños geométricos

LHD	10	yd ³
U _{LHD}	45	%
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	1000	tph
Diseño malla	15 x 17	m x m

Tabla 155: Condición de diseño LHD 10yd³.

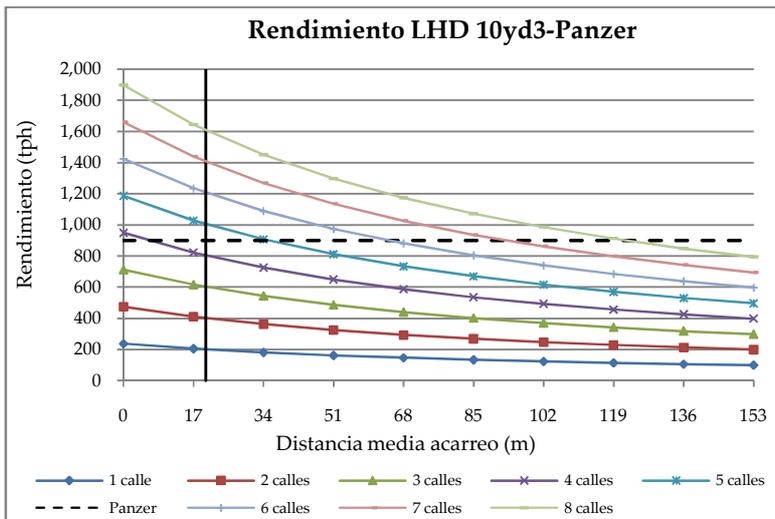


Gráfico 32: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	5	35	135
2	6	64	165
3	7	93	195
4	8	122	225

Tabla 156: Diseños geométricos

4. Pala LHD 13 yd³:

LHD	13	yd ³
U _{LHD}	45	%
D _{feeder}	90	%
D _{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	400	tph
Diseño malla	17 x 18	m x m

Tabla 157: Condición de diseño LHD 13yd³.

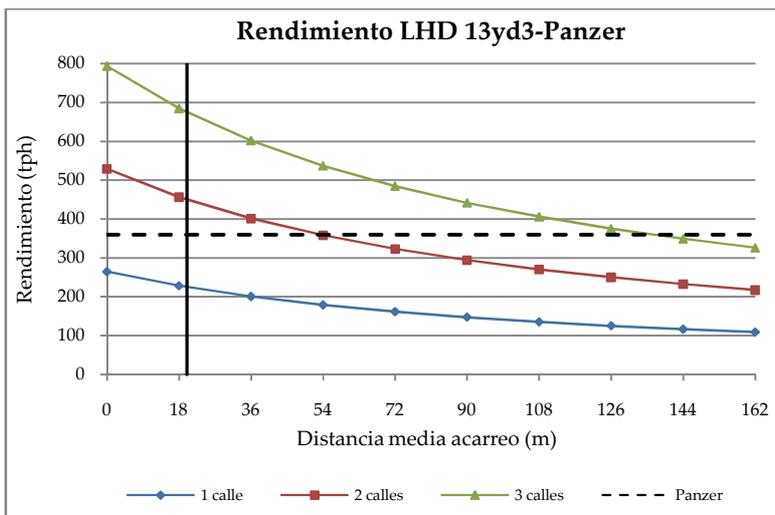


Gráfico 33: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	2	53	51
2	3	136	85

Tabla 158: Diseños geométricos

LHD	13	yd3
U_{LHD}	45	%
D_{feeder}	90	%
D_{Panzer}	90	%
Rendimiento Panzer	1000	tph
Diseño malla	17 x 18	m x m

Tabla 159: Condición de diseño LHD 13yd3.

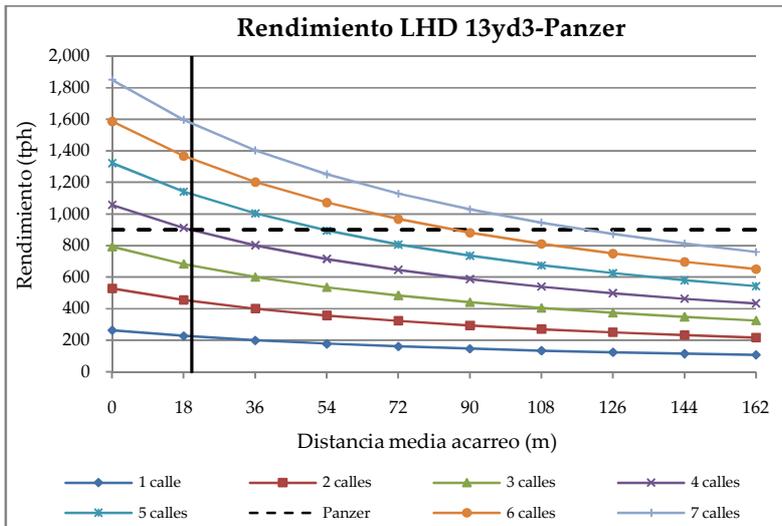


Gráfico 34: Interacción de rendimientos.

Opción	Nº de calles	Distancia media acarreo LHD (m)	Largo Panzer (m)
1	4	20	119
2	5	53	153
3	6	86	187
4	7	119	221

Tabla 160: Diseños geométricos

Anexo G: Estimación de la Confiabilidad del Diseño Minero.

1 Estado del Arte de la Teoría de Confiabilidad

1.1 Origen de la Teoría de la Confiabilidad:

Según Ramakumar¹ el sistema de confiabilidad es definido como la probabilidad de que el sistema funcionará por un rango específico de tiempo bajo determinadas condiciones. Además, afirma que para determinarlo existen 3 pasos fundamentales que son:

- Construir el modelo de confiabilidad (representativo y simple, está basado en suposiciones que deben ser válidas, descomponible y operativo).
- Analizar el modelo y calcular un índice de falla (uno para cada componente).
- Evaluar e interpretar los resultados (precisión de los resultados, comparar con otros períodos ya conocidos).

Por otro lado Basovsky², define la confiabilidad como un sistema que expresa en números la oportunidad de un equipo de operar sin falla por un período de tiempo, en un ambiente para el cual fue diseñado, y afirma que la confiabilidad de un equipo complejo dependerá de la confiabilidad de sus componentes y éstos de su tasa de falla (Cornejo, 2008).

En ambos casos, la tasa de falla es incorporada como un indicador que permite estimar cuántas fallas ocurrirán por período de tiempo y su inversa dará el tiempo promedio entre cada falla.

Además, la tasa de falla se puede descomponer en 3 etapas que han sido observadas en componentes o equipos mecánicos. Éstas conforman la llamada curva tipo “tina de baño” (Figura 2-1) y se describen a continuación:

¹ Ramakumar R. Engineering Reliability, Fundamental and Applications.

² Basovsky Igor, Reliability: Theory and Practice.

- *Fallas tempranas*: Son producto de una mala producción y se solucionan con procesos llamados “burn-in” o “debugging” que es probar el equipo y reemplazar lo que falla antes de ponerlo en operación.
- *Fallas operacionales*: Ocurren cuando el equipo ya está en operación, no se pueden eliminar ni predecir, pero siguen ciertas reglas de comportamiento en que la frecuencia por largos períodos de tiempo es aproximadamente constante.
- *Fallas de desgaste*: Ocurren al final de la vida útil del equipo producto de desgaste y cuando los componentes tienen poca mantención. La ventaja de éstas es que se pueden predecir.

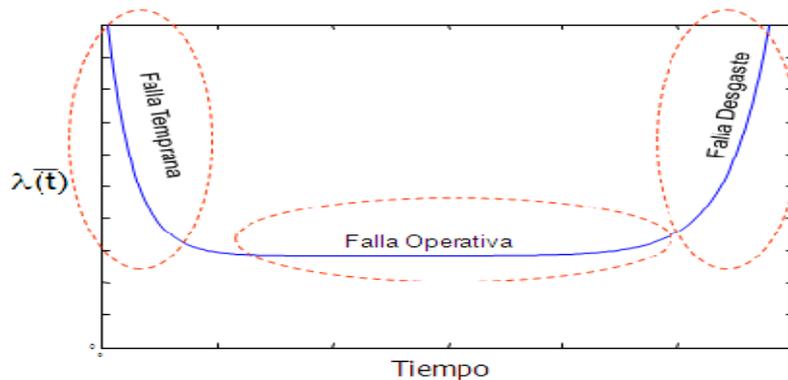


Figura 24: Representación Curva de Bañera (Cornejo M, 2008)

Cada una de estas etapas sigue una distribución específica que para su determinación deben ser usados diferentes modelos matemáticos.

1.2 Confiabilidad de Múltiples Componentes:

Según el trabajo “Reliability Principles and Practices” de Calabro S. R., afirma que múltiples componentes relacionados pueden estar unidos de 4 formas:

1. En serie;
2. En Paralelo;
3. Series paralelas; y
4. Paralelos en Series.

Estas relaciones de múltiple componentes se pueden ver de forma ejemplificada en la siguiente figura.

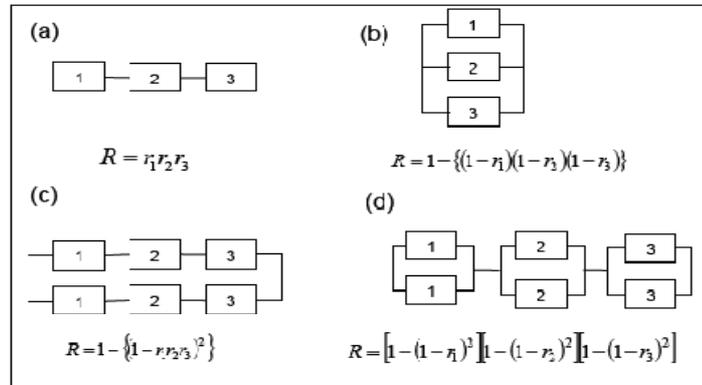


Figura 25: Configuración de los distintos sistemas (Cornejo, 2008).

La forma de determinar la confiabilidad del sistema para las distintas opciones de configuración se muestra a continuación.

a. Sistema en serie:

$$R(T)_{sistema} = \prod_i R(T)_i$$

Ecuación 11: Cálculo de Confiabilidad de un sistema en serie.

En este caso, basta que falle un componente para que falle el sistema completo.

b. Sistema en paralelo:

$$1 - R(T)_{sistema} = \prod_i (1 - R(T)_i)$$

Ecuación 12: Cálculo de Confiabilidad de un sistema en paralelo.

En este caso es necesaria la falla de todos los componentes para que falle el sistema.

c. Sistema de Series Paralelas:

$$1 - R(T)_{sistema} = \prod_i (1 - R_{series}(T)_i)$$

Ecuación 13: Cálculo de Confiabilidad de un sistema de series paralelas.

Este sistema está compuesto de series en paralelo, si falla un componente de una serie la serie completa falla, pero el sistema sigue trabajando con las otras series

que están en paralelo a la que falló. Para que falle totalmente el sistema, debe fallar al menos un componente de cada serie.

d. Sistema de series de paralelos:

$$R(T)_{sistema} = \prod_i R_{paralelo}(T)_i$$

Ecuación 14: Cálculo de Confiabilidad de un sistema de series de paralelos.

Este sistema está compuesto por subsistemas en paralelo y cada uno de estos subsistemas está en serie. Para que falle todo el sistema se necesita que fallen todos los componentes de un subsistema.

1.3 *El modelo de confiabilidad*

Para introducir el concepto de confiabilidad, hay algunas definiciones que tienen que ser descritas con el fin de formular los modelos matemáticos que apoyen los cálculos de confiabilidad.

Confiabilidad (del plan de producción): es la probabilidad de al menos alcanzar el tonelaje meta del programa de producción, en el período establecido.

Falla: cuando el sistema minero no cumple los tonelajes establecidos en el intervalo temporal pertinente.

Evento: interrupción que detiene el flujo de mineral a través de una componente minera, pero que no necesariamente hace fallar al sistema.

1.3.1 *Parámetros del modelo*

a) **Curvas U**: Muestra la relación entre la frecuencia de ocurrencia de eventos, que se define como el número de eventos por tonelada y el tonelaje acumulado que se ha extraído (madurez de la componente). En particular para un punto de extracción, la curva U es similar a la siguiente:

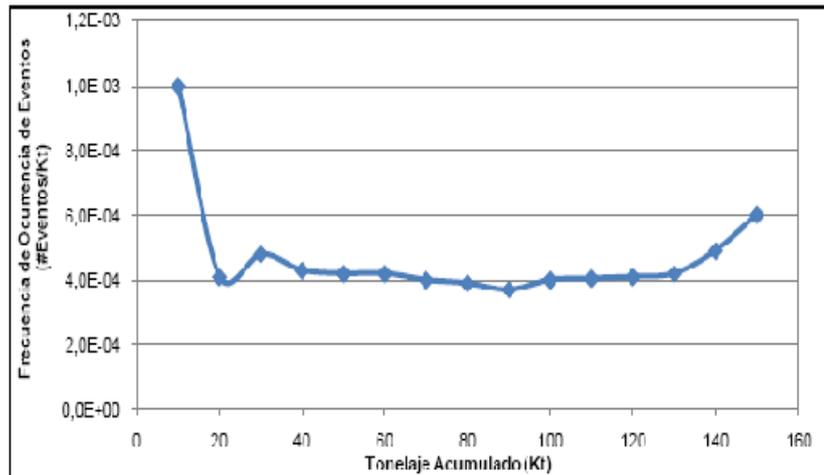


Figura 26: Ejemplo de Curva U.

La frecuencia de ocurrencia de eventos se representará como $\lambda(t)$. La curva U se utiliza para obtener el número esperado de eventos en un determinado intervalo de tonelaje $[t_i, t_i + t_i^p]$, donde t_i^p es el tonelaje planificado para la i -ésima componente en un periodo de tiempo dado y t_i es la madurez actual de la componente. El número esperado de eventos puede ser estimado como:

$$\#Eventos = \int_{t_i}^{t_i+t_i^p} \lambda(t) dt$$

Ecuación 15: Estimación número de eventos.

b) Curva de Producción Característica (PCC): La Curva de Producción Característica (PCC)³ describe la productividad (toneladas / período) de un componente de la infraestructura minera, en función del número de eventos experimentados. Por ejemplo, el Gráfico 2-4 muestra los resultados de una simulación para estimar la PCC de un punto de extracción, que se interrumpe con diferentes frecuencias de eventos. Se puede observar, que el número esperado de eventos afecta a la productividad del punto de extracción. El mismo ejercicio

³ Salamanca Candia, Felipe Alonso. Aplicación de Redundancia Activa en la Programación de Producción de Mina Subterránea. Santiago, Chile, 2007.

puede realizarse con la información de extracción histórica de la mina, con el fin de obtener la PCC de cualquier componente.

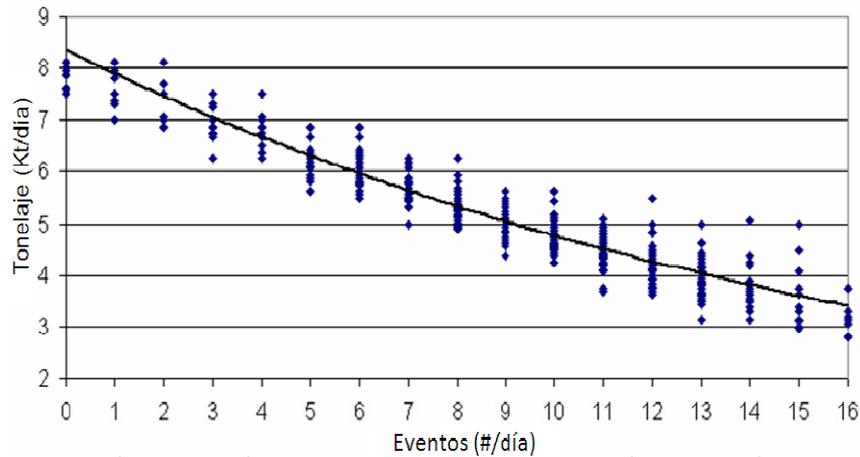


Figura 27: Curva PCC

La construcción de una curva PCC se basa en la información histórica de funcionamiento, tales como la condición de la componente, el tonelaje extraído por turno, entre otros.

Existen algunos cuestionamientos importantes relacionados con la construcción de la curva anterior, y estas son (Cornejo, 2008):

- La productividad máxima de una componente está limitada por el programa de producción, debido a que no necesariamente se planifica un tonelaje igual a la capacidad productiva máxima en un período determinado.
- En la práctica, el número de puntos obtenidos por cada número de eventos puede ser pobre y no permitir el ajuste adecuado de un modelo de distribución de probabilidad y, en consecuencia, no reporta valores de confiabilidad apropiados.

Para evitar el problema expresado en el primer punto, se puede construir un modelo de simulación que imite el comportamiento de la componente analizada en términos de productividad. Sin embargo, este modelo debe ser capaz de incorporar la

ocurrencia de eventos de interferencia y su reparación acorde a las estrategias utilizadas en el sistema minero analizado (Cornejo M., 2008).

1.3.2 Cálculo de Confiabilidad de las Componentes del Sistema

Cada componente del sistema tiene su propia PCC. La curva se usa para obtener la confiabilidad de un componente específico, en relación a su tonelaje planificado. A continuación, se explica la metodología para llegar a la confiabilidad de una componente dada su PCC, el tonelaje planificado t_i^p y su curva $U \lambda(t)$:

- a) Con el tonelaje y la madurez de los componentes, calcular el número esperado de eventos N de la curva U .

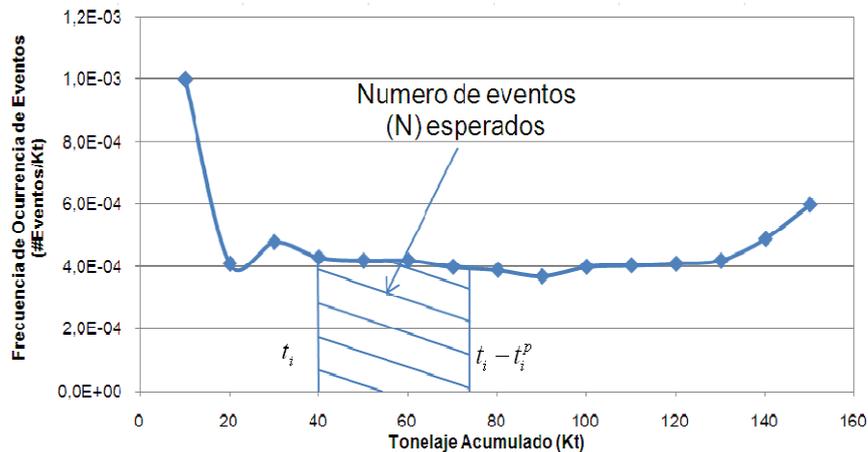


Figura 28: Estimación de número de eventos mediante Curva U (Cornejo, 2008).

- b) Rescatar desde la PCC, entrando por el eje de las abscisas con el valor del número de eventos N , y recoger todos los puntos de productividad asociados (media y desviación estándar).

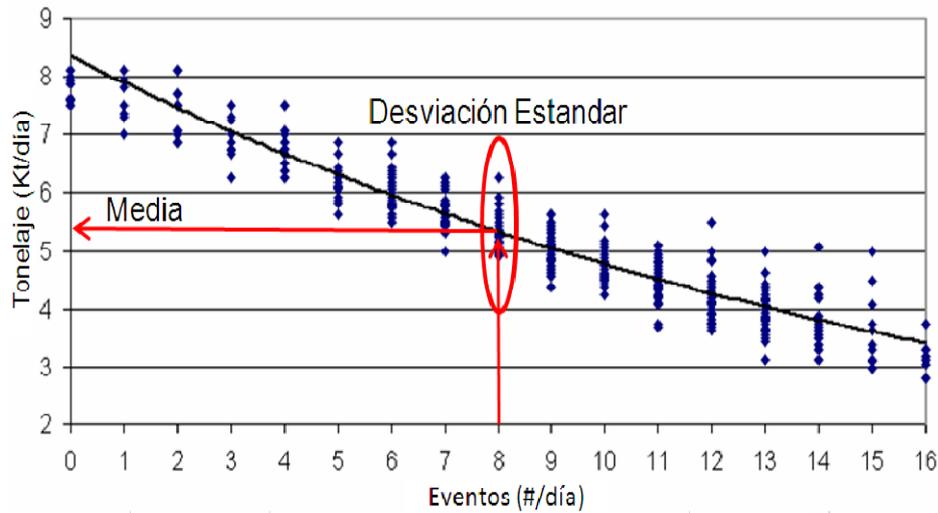


Figura 29: Estimación de confiabilidad desde curva PCC (Cornejo, 2008).

- c) Graficar el siguiente histograma (Figura 2-7) con los valores de la media y desviación estándar obtenida (el modelo de distribución de probabilidad viene de la productividad de los puntos rescatados de la PCC, la cual no necesariamente es Gaussiana):

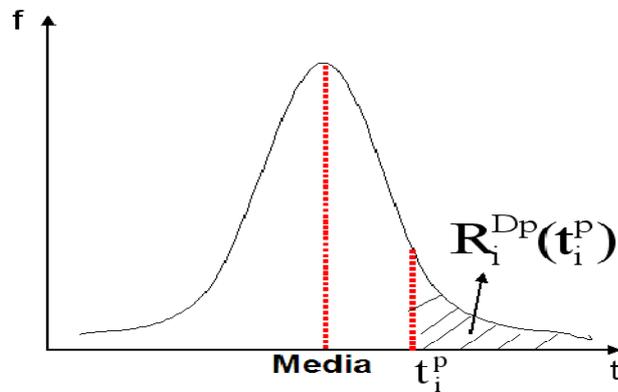


Figura 30: Distribución de tonelaje de la PCC de una componente (Cornejo, 2008),

El área bajo la curva, desde t_i^p a ∞ representa la probabilidad de alcanzar un tonelaje superior o igual a t_i^p para la componente especificada. Por lo tanto, es la confiabilidad de la componente i para el tonelaje t_i^p , denotada como $R_i^{DP}(t_i^p)$. Debe notarse que cuanto mayor sea el tonelaje planificado, menor será la confiabilidad de la componente.

2 Aplicación de la teoría de confiabilidad a los diseños óptimos obtenidos para una configuración LHD-Panzer

Para desarrollar el modelo de confiabilidad a usar, es necesario contar con algunos supuestos debido a falta de información o complejidad.

2.1 *Supuestos considerados:*

Para armar el modelo de confiabilidad para evaluar los diseños óptimos obtenidos en el capítulo 5, es necesario hacer algunas consideraciones y/o supuestos que se mencionan a continuación.

- Los datos históricos de producción utilizado en este trabajo provienen de un benchmarking de una faena explotada mediante block caving mecanizado en roca primaria;
- No se tiene información acerca de la curva PCC para calles menores a 30 puntos de extracción, por lo que se toma el supuesto que todas las calles de los diseños obtenidos se comportan como una calle de 30 puntos de extracción.
- La curva de confiabilidad del equipo Panzer será la misma independiente de la capacidad o rendimiento de éste.
- La producción de todos los puntos de extracción se comportan bajo una misma distribución normal. Luego bastará estimar la curva de PCC para un punto.
- Se considera un tonelaje nominal de un cruzado de producción de 200.000 (t).
- Para aplicar la teoría de confiabilidad, se requiere de un plan productivo, pero como no se tiene dicho plan, se supone una producción de acuerdo a la capacidad máxima de producción del módulo y para los eventos de interferencias esperada en las componentes, se consideran 3 estados de madurez de éstas: inicial, intermedio, final y tiene relación con el tonelaje acumulado. Esto entregará distintos número de eventos y se obtiene de la curva U.
- El número de eventos esperados se obtiene del área bajo la curva U, considerando un tonelaje inicial y final acumulado.

2.2 Parámetros del Modelo para la Confiabilidad:

Con datos históricos obtenidos de un benchmarking, se grafican la curva U, de un punto de extracción, y PCC, de un punto y de una calle, para mineral primario.

a. Resultado Curva U:

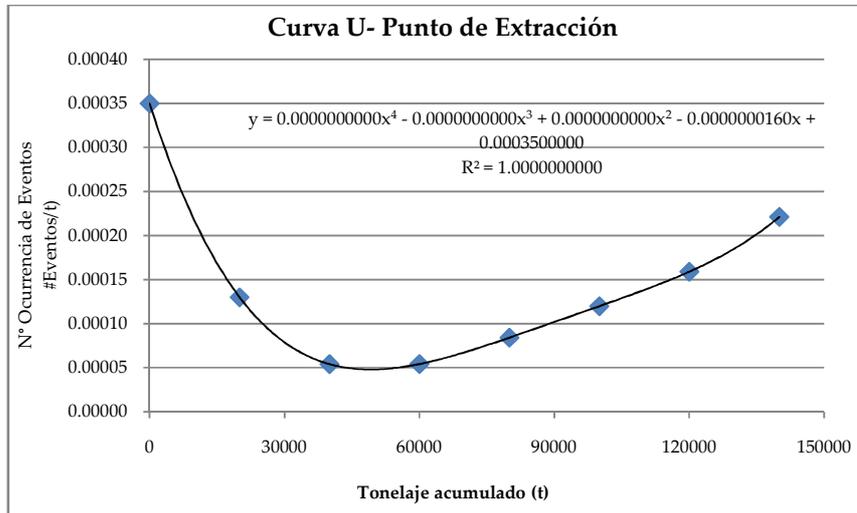


Gráfico 35: Curva U de punto de extracción, roca primaria.

b. Resultados de Curva PCC:

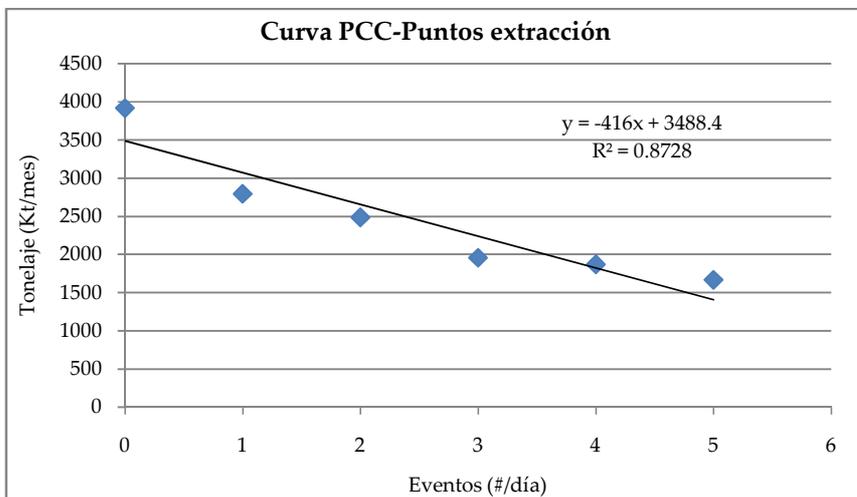


Gráfico 36: Curva PCC del punto de extracción, roca primaria proveniente un benchmark.

Los puntos de la curva PCC corresponden a la media del tonelaje de extracción para cierto número de eventos.

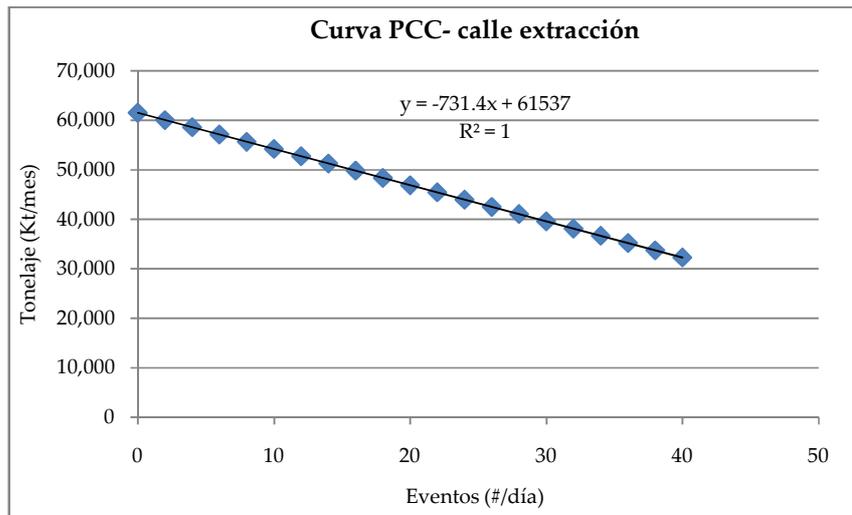


Gráfico 37: Curva PCC calle de extracción, roca primaria. proveniente un benchmark.

El gráfico anterior corresponde a la curva PCC para una calle de producción con 30 a 40 puntos de extracción. Dado que no se tiene la curva PCC para calles con número de puntos inferiores a 30, se supone que tendrán el mismo comportamiento a aquellas con 30 a 40 puntos.

El modelo de producción, tanto para el punto como para la calle, debe contar con la pendiente y la intersección con el eje y, y la desviación estándar para cada componente. En este caso, se considera como componentes del sistema el punto de extracción, la calle de producción y el sistema acarreo Panzer. Este último se omitirá dado que no hay pruebas realizadas para este efecto. Para la desviación estándar, se utiliza el máximo valor, siendo para el punto de extracción 1.417, mientras que para la calle de producción es de 20.033.

Como resultado de las curvas PCC se puede obtener el Modelo de Producción, como muestra la siguiente tabla.

Modelo de Producción			
Componente	Pendiente	Intersección eje y	Desviación estándar
Punto	-416,0	3.488	1.417
Calle	-731,4	61.537	20.033

Tabla 161: Modelo de Producción para puntos y calles.

El resultado final de la confiabilidad del diseño de cada pala LHD, diferenciado según el estado de madurez de las componentes (puntos de extracción) es mínima. Es decir, hay una probabilidad nula de lograr altísimas productividades bajo los diseños finales obtenidos en el trabajo.

En la siguiente planilla se muestran los valores de los parámetros utilizados y los resultados de los cálculos de la confiabilidad de los diseños.

	LHD 4 yd3	LHD 7 yd3	LHD 10 yd3	LHD 13 yd3
Índices de Operación				
Utilización LHD	45%	45%	45%	45%
Disponibilidad Panzer	90%	90%	95%	90%
Disponibilidad feeder	90%	90%	95%	90%
Geometría				
N° Panzer	1	1	1	1
N° calles	3	4	3	4
N° puntos/calle	6	8	6	6
Largo calle (m)	44	50	42	40
Área 1 calle (m2)	1080	1664	1530	1836
Productividad (tph)				
LHD	329	432	546	617
Panzer	400	700	700	1000
T nominal (t)				
x calle	200,000	200,000	200,000	200,000
x Nptos/calle	33,333	25,000	33,333	33,333
Plan de Producción (t/m)				
Tonelaje de Módulo	259,200	453,600	478,800	648,000
Tonelaje Panzer	259,200	453,600	478,800	648,000
Tonelaje x calle	86,400	113,400	159,600	162,000
Tonelaje x punto	14,400	14,175	26,600	27,000
N° Eventos Esperados (#)				
Panzer	-	-	-	-
Punto	Inicial	6	2	1
	Intermedio	2	1	0

	Final	5	2	1	1
Calle	Inicial	19	10	4	2
	Intermedio	5	2	1	1
	Final	16	9	3	2
Modelos de Producción					
Panzer:					
Punto:	Slope	-416	-416	-416	-416
	Intercept	3,488	3,488	3,488	3,488
	Std	1,417	1,417	1,417	1,417
Calle	Slope	-731	-731	-731	-731
	Intercept	61,537	61,537	61,537	61,537
	Std	20,033	20,033	20,033	20,033
Distribuciones Condicionales					
Estado maduración inicial	Panzer	Media	10,082	10,082	10,082
		Std	-0.003	-0.003	-0.003
	Calle	Media	47,999	54,311	58,948
		Std	20,033	20,033	20,033
	Punto	Media	921	2,460	2,997
		Std	1,417	1,417	1,417
Estado maduración intermedia	Panzer	Media	10,082	10,082	10,082
		Std	-0.003	-0.003	-0.003
	Calle	Media	58,158	59,752	60,901
		Std	20,033	20,033	20,033
	Punto	Media	2,847	3,234	3,367
		Std	1,417	1,417	1,417
Estado maduración final	Panzer	Media	10,082	10,082	10,082
		Std	-0.003	-0.003	-0.003
	Calle	Media	49,710	55,218	59,277
		Std	20,033	20,033	20,033
	Punto	Media	1,246	2,589	3,060
		Std	1,417	1,417	1,417
Confiabilidad Entidades					
Estado maduración inicial	Panzer		95.0%	95.0%	94.0%
	Calle		2.8%	0.2%	0.0%
	Punto		0.0%	0.0%	0.0%
	K ptos		2	4	4
	K calles		1	2	2
Estado maduración intermedia	Panzer		95.0%	95.0%	94.0%
	Calle		7.9%	0.4%	0.0%
	Punto		0.0%	0.0%	0.0%
	K ptos		2	4	4
	K calles		1	2	2

Estado maduración final	Panzer		95.0%	95.0%	94.0%	95.0%
	Calle		3.4%	0.2%	0.0%	0.0%
	Punto		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	K ptos		2	4	4	4
	K calles		1	2	2	3
	Confiabilidad Sistema					
inicial	Ptos-Cx producción		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Sistema		0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
Medio	Ptos-Cx producción		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Sistema		0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
Final	Ptos-Cx producción		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Sistema		0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabla 162: Planilla hoja cálculo de Confiabilidad de los diseños.

3 Análisis de Sensibilidad

Se hizo un análisis de la variación de la confiabilidad en función de área incorporada. Es decir, en función de la incorporación de calles de extracción relacionadas al Panzer. Esto se hace obviando el límite del largo del equipo Panzer impuesto por los fabricantes.

Los resultados del análisis se muestran mediante gráficos para cada pala LHD. Los gráficos presentan las siguientes curvas:

- Curva de velocidad de extracción, en eje principal;
- Curva de confiabilidad considerando una etapa inicial de la maduración de las componentes, en el eje secundario;
- Curva de confiabilidad considerando una etapa intermedia de la maduración de componentes, en eje secundario;
- Curva de confiabilidad considerando una etapa final de la maduración de componentes, en eje secundario.

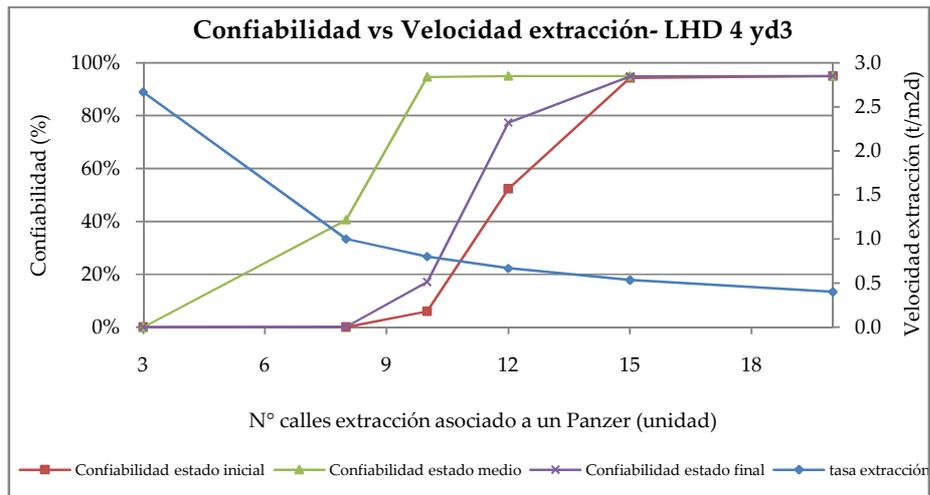


Gráfico 38: Confiabilidad vs tasa de extracción, LHD 4yd3.

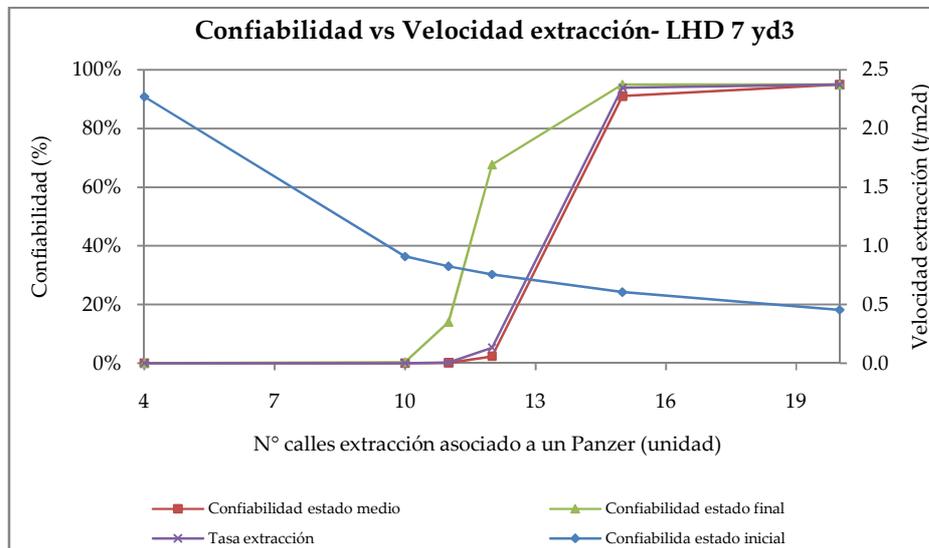


Gráfico 39: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 7yd3.

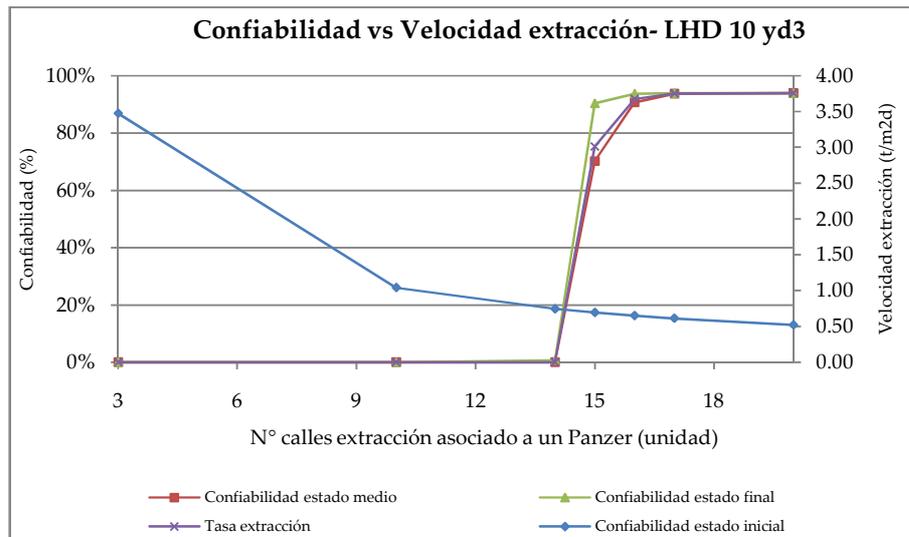


Gráfico 40: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 10yd3.

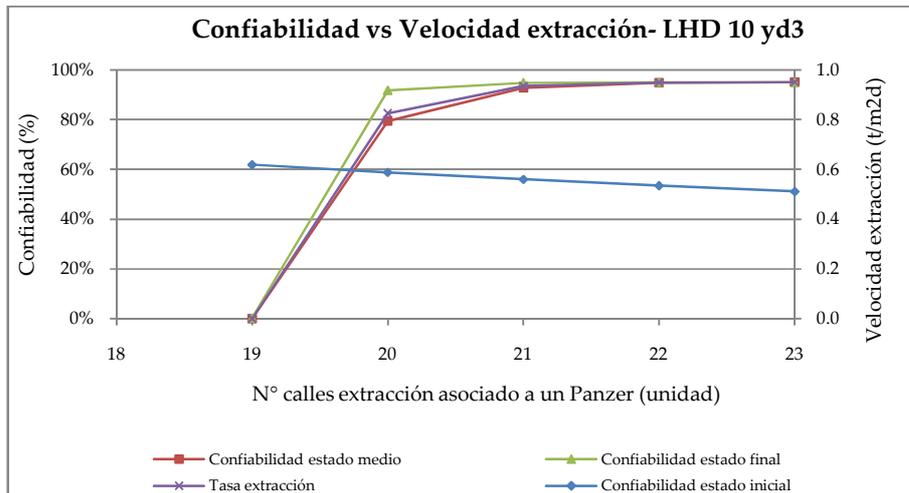


Gráfico 41: Confiabilidad de diseño vs tasa de extracción, LHD 13yd3.

De los gráficos anteriores se deduce que la confiabilidad del diseño aumenta a medida se incorpora más cruzados de extracción o área de hundimiento. De este modo se exige menos a los puntos de extracción, y además da mayor flexibilidad de operación al contar con un mayor número de puntos como de cruzados de producción. Sin embargo, el aumento de la confiabilidad contrarresta la productividad del área hundida y aumenta la necesidad de recursos para labores de extracción.

La baja confiabilidad de los diseños finales obtenidos se debe a que se sobre exigen la producción de cada punto de extracción por unidad de tiempo. Y dadas las condiciones actuales de minería para enfrentar eventos tales como colgadura, sobre tamaño, entre otro, no sería posible implementar tales diseños. Luego, no solo basta con mejorar y optimizar el diseño, sino también es necesario mejorar todas las operaciones complementarias a la de extracción del mineral.