

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE ILUSTRACIONES	ix
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. CONTEXTO DE LA INDUSTRIA.....	11
1.2. PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA	13
1.3. DESARROLLO TECNOLÓGICO	16
1.3.1. LHD SEMI AUTÓNOMO (LHD SA).....	17
1.3.2. ESTADO DE MADUREZ TECNOLOGÍA	17
1.4. CENTROS INTEGRADOS DE OPERACIÓN Y GESTIÓN	18
1.5. PLANIFICACIÓN.....	19
1.6. CONTEXTO EN CODELCO.....	20
2. UNA PROPUESTA DE FUTURO PARA LA MINERÍA SUBTERRÁNEA	21
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	21
2.2. OBJETIVOS	23
2.2.1. OBJETIVO GENERAL	23
2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2.3. METODOLOGÍA	23
2.4. ALCANCE	25
3. MARCO CONCEPTUAL	26
3.1. CENTRO DE OPERACIÓN Y GESTIÓN PMCHS	26
3.2. CONCEPTOS DE GESTIÓN DE TIEMPOS DE ESPERAS.....	27
3.2.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE COLAS	28
3.2.2. NOTACIÓN DE KENDALL	29
4. ASIGNACIÓN DINÁMICA DE OPERADORES APLICADA A PRODUCCIÓN DE MINAS MEDIANTE LHD SA	32
4.1. TEORÍA DE COLAS APLICADA AL CASO LHD SA (CASO GENERAL).....	32
4.1.1. GENERALIDADES.....	32
4.1.2. CASO LHD MANUAL.....	32
4.1.3. CINEMÁTICA DEL EQUIPO LHD	33
4.1.4. PRODUCTIVIDAD DEL EQUIPO LHD.....	35
4.1.5. CASO LHD SA	36
4.1.6. FUENTES DE VARIABILIDAD.....	42
4.2. APLICACIÓN AL CASO PARTICULAR DISEÑO VIGENTE PMCHS	43
4.2.1. GENERALIDADES DEL DISEÑO PMCHS	43
4.2.2. CASO LHD SA PMCHS BAJO SIMULACIÓN.....	43

4.2.3.	CASO LHD SA PMCHS BAJO ESTRUCTURA DE MODELO DE COLAS.....	49
4.3.	AJUSTE DEL MODELO PROPUESTO.....	56
4.4.	EJERCICIOS DE PRODUCTIVIDAD BASADOS EN TEORÍA DE COLAS.....	58
4.4.1.	SUPUESTOS.....	59
4.4.2.	CASOS PROPUESTOS.....	60
4.5.	SENSIBILIDAD A VARIABLES RELEVANTES.....	61
4.5.1.	LÓGICA DE ASIGNACIÓN Y SU EFECTO EN LOS TIEMPOS DE ATENCIÓN.....	61
4.5.2.	VARIACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE OPERADORES DURANTE EL TURNO.....	62
4.5.3.	CAMBIOS AL UNIVERSO DE CLIENTES.....	63
4.5.4.	CASOS PROPUESTOS DE SENSIBILIDAD.....	64
5.	IMPLICANCIAS AL NEGOCIO.....	65
5.1.	PRODUCTIVIDAD.....	65
5.1.1.	RESULTADOS DE PRODUCTIVIDAD.....	66
5.2.	RIESGOS Y OPORTUNIDADES.....	69
5.2.1.	DISEÑO ENCUESTA.....	69
5.2.2.	RESULTADOS.....	73
5.3.	DISCUSIÓN.....	77
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
6.1.	CONCLUSIONES.....	82
6.2.	RECOMENDACIONES.....	86
6.2.1.	SIMULACIONES Y ESTUDIOS DE MODELACIÓN.....	87
6.2.2.	ROADMAP DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	87
6.2.3.	OPCIONES DE FUTURO.....	90
6.4.	REFLEXIÓN FINAL.....	91
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	93
8.	GLOSARIO.....	95
9.	ANEXOS.....	97
9.1.	ESTADO DEL ARTE LHD SA EN PMCHS.....	9-1
9.2.	RESPALDO DECISIÓN APLICACIÓN LHD'S SA EN PMCHS.....	9-4
9.3.	CENTRO INTEGRADO DE OPERACIÓN Y GESTIÓN.....	9-8
9.4.	FILOSOFÍA DE OPERACIÓN SUBNIVEL DE PRODUCCIÓN.....	9-12
9.4.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	9-12
9.4.2.	ETAPA DE PROPAGACIÓN.....	9-13
9.4.3.	ETAPA DE EXTRACCIÓN.....	9-15
9.4.4.	ASIGNACIÓN.....	9-16
9.4.5.	CONSIDERACIONES OPERACIONALES.....	9-16

9.4.6.	DEFINICIÓN DEL USO DEL TIEMPO	9-20
9.4.7.	ETAPA DE OPERACIÓN DE CIERRE.....	9-23
9.5.	DESCRIPCIÓN MODELO DE SIMULACIÓN.....	9-24
9.5.1.	OPERACIÓN DEL MODELO	9-24
9.5.2.	INPUT RELEVANTES.....	9-25
9.5.3.	VARIABLES RELEVANTES.....	9-25
9.6.	RESULTADO MODELAMIENTO MEDIANTE TEORÍA DE COLAS	9-26
9.7.	RESULTADO PRODUCTIVIDAD.....	9-38
9.8.	RESULTADOS ENCUESTA	9-41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Funcionalidades requeridas en LHD SA.....	18
Tabla 2: Esquema conceptual de análisis	44
Tabla 3: Parámetros Operación PMCHS	51
Tabla 4: Resultados Comparación simulación y modelo teórico	57
Tabla 5: Resumen de Casos Sensibilidad 1 de 2.....	60
Tabla 6: Resumen de Casos Sensibilidad 2 de 2.....	64
Tabla 7: Resumen resultados de productividad	67
Tabla 8: Pregunta 1 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	70
Tabla 9: Pregunta 2 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	70
Tabla 10: Pregunta 3 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	70
Tabla 11: Pregunta 4 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	71
Tabla 12: Pregunta 5 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	71
Tabla 13: Pregunta 6 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	71
Tabla 14: Pregunta 7 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	72
Tabla 15: Pregunta 8 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	72
Tabla 16: Pregunta 9 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	73
Tabla 17: Pregunta 10 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	73
Tabla 18: Pregunta 11 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	73
Tabla 19: Pregunta 12 Encuesta Teleoperación en Base a Asignación Dinámica.....	73
Tabla 20: Resultados Encuesta.....	74
Tabla 21: Descripción de la oportunidad (1/2).....	9-5
Tabla 22: Descripción de la oportunidad (2/2).....	9-7
Tabla 23: Horas operativas año por equipo principal	9-21
Tabla 24: Cálculo Factor Operacional LHD SA	9-22
Tabla 25: Horas operativas año por equipo de apoyo.....	9-23

Tabla 26: Resultados productividad (1 de 3).....	9-39
Tabla 27: Resultados productividad (2 de 3).....	9-39
Tabla 28: Resultados productividad (3 de 3).....	9-40

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Marco Conceptual.....	12
Ilustración 2: Esquema General Proyecto Chuquicamata Subterránea	15
Ilustración 3: Modelo general de manejo de minerales PMCHS	15
Ilustración 4: Equipo LHD SA y Martillo en Subnivel de Producción	16
Ilustración 5: Hipótesis de trabajo – Sistema de Cola LHD SA + Martillo+Operadores..	24
Ilustración 6: Metodología de trabajo propuesta.....	25
Ilustración 7: Concepto CIOG PMCHS.....	26
Ilustración 8: Esquema conceptual teoría de colas	28
Ilustración 9: Esquema conceptual del ciclo típico de un LHD manual	33
Ilustración 10: Cinemática LHD (Tiempo).....	34
Ilustración 11: Cinemática LHD (Distancia).....	35
Ilustración 12: Productividad LHD v/s Distancia de Transporte.....	36
Ilustración 13: Secuencia de interacción LHD SA y CIOG	37
Ilustración 14: Esquema conceptual del ciclo típico de un LHD SA	38
Ilustración 15: Ejemplo de ciclo sin formación de cola	40
Ilustración 16: Ejemplo de ciclo con formación de cola.....	41
Ilustración 17: Capacidad productiva escenarios simulación IB PMCHS	46
Ilustración 18: Holgura escenarios simulación IB PMCHS	46
Ilustración 19: Resultados simulación IB PMCHS – Esc 1	46
Ilustración 20: Resultados simulación IB PMCHS – Esc 2	47
Ilustración 21: Resultados simulación IB PMCHS – Esc 3	47
Ilustración 22: Resultados simulación IB PMCHS – Esc 4	47
Ilustración 23: Comparación entre resultados simulación y función exponencial.....	49
Ilustración 24: Ejemplo Cola M/M/C/GD/K (4,02 s / 40 s / variable / GD / 32)	53

Ilustración 25: Productividades operadores de telecomandos consideradas en Ingeniería Básica PMCHS.....	54
Ilustración 26: Tiempo de ciclo LHD SA Caso Simulación y Teoría de Colas	57
Ilustración 27: Productividad LHD SA Caso Simulación y Teoría de Colas	57
Ilustración 28: Esquema general de sistema de colas con operadores individuales	58
Ilustración 29: Esquema general de sistema de colas con operadores agrupados.....	59
Ilustración 30: Distribución de distancias entre punto de vaciado y puntos de extracción	61
Ilustración 31: Diagrama general productividad en minas subterráneas	65
Ilustración 32: Resumen resultados de productividad	67
Ilustración 33: Propuesta de Roadmap para desarrollo Filosofía Operación Basada en Industry 4.0.....	89
Ilustración 34: Vista en Planta Nivel de Producción típico Macro Bloque.....	9-2
Ilustración 35: Futura Infraestructura del CIO&G PMCHS	9-8
Ilustración 36: Arquitectura lógica del CIO&G	9-10
Ilustración 37: Planta CIOG.....	9-11
Ilustración 38: Zonificación Final de Mallas de Extracción Nivel 1841 Ingeniería Básica	9-12
Ilustración 39: MB típico y su infraestructura.....	9-13
Ilustración 40: Avance en la apertura de bateas en los Macro Bloques centrales.....	9-14
Ilustración 41: Sistema con barreras físicas y lógicas que aíslan una semicalle.....	9-18
Ilustración 42: MB tipo con distintas actividades y las barreras que aíslan las semicalles.	9-19
Ilustración 43: Definición uso del tiempo	9-20
Ilustración 44: Resultados sensibilidad a variables relevantes.....	9-38