



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

**ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD Y DESEMPEÑO DE LA OPERACIÓN
SEMIAUTÓNOMA EN EQUIPOS DE CARGA; ACARREO Y DESCARGA EN
MINERÍA SUBTERRÁNEA
Load Haul-Dump Vehicle (LHD)**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER
EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

PABLO ALBERTO URIBE NEIRA

**PROFESOR GUÍA
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
IVAN BRAGA CALDERON
MAURICIO BARRAZA GALLARDO**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2014**

RESUMEN

Actualmente existen importantes desafíos en minería, no solo por las cifras de inversión estimadas, sino también por necesidad de incorporar nuevas tecnologías, generadas en base a los desafíos planteados por el aumento de costos. Los principales nuevos desafíos son derivados de las características de la roca primaria, la baja en la ley de mineral, los requerimientos de sustentabilidad y la mayor preocupación por mejorar los estándares de seguridad y salud ocupacional de los operadores.

Para el futuro se requieren procesos altamente automatizados, equipamientos autónomos y operaciones telecomandadas, gestionadas fuera de las minas en busca de la continuidad operacional. Tratar de mantener los costos bajos y mejorar la productividad es el gran desafío que presenta la Minería Subterránea. En esta tesis se analizará el estado del arte de la tecnología de equipos LHD semiautónomos, sus limitaciones, las lecciones aprendidas, así como los sistemas y metodologías de navegación existentes asociados con el automatizado subterráneo en la carga, transporte y descarga, además de los resultados obtenidos en la División el Teniente.

La implementación de esta tecnología en División el Teniente nació como solución a los problemas de seguridad y calidad de vida de los trabajadores, así como también para contar con un equipo robusto capaz de enfrentar las exigencias que demanda el mineral primario a ser extraído, una de las ventajas que se espera obtener como resultado, es un mayor tiempo de operación en comparación con los equipos manuales.

El análisis se basará en la utilización de equipos LHD (cargadores de bajo perfil para la tarea de extracción de mineral, que consiste en cargar, transportar y descargar la roca mineralizada), los cuales cuentan con la tecnología que les permite operar en una condición semi-automática, es decir sin operador a bordo, controlados a distancia por operadores ubicados al exterior de la mina en una sala de control distante kilómetros del área productiva.

La tecnología ha demostrado ser factible de aplicar, sin embargo, se han detectado brechas en el desempeño y funcionalidades respecto de los requerimientos planteados para la División El Teniente en su Proyecto Estructural Nuevo Nivel Mina, por lo cual se requiere incorporar nuevos desarrollos tecnológicos a través de un programa de innovaciones incrementales de la tecnología de automatización de LHD, bajo un Modelo de Negocio ad-hoc y efectuar un cambio significativo de las estrategias y tácticas operacionales, mantenimiento, planificación, control centralizado, diseños mineros, entre las más relevantes, para así optimizar y capturar el mayor valor del uso de los equipos LHD semi-autónomos.

El gran desafío que hoy nos impone la minería, de expandir la capacidad de producción para satisfacer las futuras demandas de los minerales, está requiriendo con urgencia de un mayor desarrollo y apoyo de las tecnologías de automatización en la minería. La dimensión de los proyectos permite generar cambios tecnológicos en pos de encontrar herramientas y sistemas que garanticen en mayor medida la calidad, eficiencia y control de las operaciones mineras. Es ahí donde está el desafío: identificar, adaptar, prepararse e implementar estas tecnologías.

DEDICATORIA.

A mis hijos Alonso y Antonia...

Por su comprensión, amor y compañía en este desafío...

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.	OBJETIVOS ESTRATEGICOS	3
2.	OBJETIVOS Y ALCANCE.....	6
3.	ANTECEDENTES MINA SUBTERRANEA DIVISION EL TENIENTE – CODELCO CHILE.....	7
3.1.	RESERVAS MINERAS.....	9
3.2.	OPERACIÓN ACTUAL.....	10
4.	ESTADO DEL ARTE EN LA AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS DE EXTRACCIÓN (LHD).....	14
4.1.	EXPERIENCIA DE AUTOMATIZACION DE EQUIPOS SUBTERRANEOS.....	18
4.2.	ANALISIS COMPARATIVO DE OPERACIÓN MANUAL Y EQUIPOS LHD SA.....	21
4.3.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AUTOMATIZACION.....	23
4.4.	ANTECEDENTES SOBRE NAVEGACION EN MINERIA SUBTERRANEA	23
4.5.	NAVEGACION EQUIPOS LHD EN MINERIA SUBTERRANEA.....	25
5.	MODELO OPERACIONAL DE MINERIA SUBTERRÁNEA SEMIAUTÓNOMA.....	28
5.1.	GENERACIÓN DE VALOR DEL MODELO OPERACIONAL DE MINERÍA SEMIAUTÓNOMA.....	32
5.2.	DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS Y PARAMETROS CLAVES.....	37
6.	ANALISIS DE FORTALEZAS, DEBILIDADES DE LA TECNOLOGIA EN EQUIPOS LHD SEMI-AUTONOMOS.....	40
6.1.	INDICADORES CLAVES DE DESEMPEÑO	42
6.2.	DIAGNOSTICO DE LA TECNOLOGIA EQUIPOS MINERIA SUBTERRANEA.....	46
6.3.	DIAGNOSTICO DE PRINCIPALES PROVEEDORES EQUIPOS LHD MINERIA SUBTERRANEA.....	51
7.	COMPORTAMIENTO OPERACIÓN EQUIPOS SEMIAUTONOMOS SECTOR PIPA NORTE EN DIVISION EL TENIENTE – CODELCO CHILE.....	57
7.1.	INDICADORES OPERACIONALES REALES VERSUS COMPROMETIDOS POR PROYECTO.....	62
8.	EFFECTOS E IMPACTOS EN AUTOMATIZACIÓN EQUIPOS.....	71
8.1.	EVALUACION ECONOMICA DE IMPLEMENTACION DE OPERACIÓN SEMIAUTONOMA EN EQUIPOS LHD.....	78
9.	DISCUSION Y CONCLUSIONES.....	81
10.	BIBLIOGRAFIA.....	86

CONTENIDO TABLAS

TABLA 1-1 RESUMEN DE OBJETIVOS ESTRATÉGICOS.....	4
TABLA 3-1 PROGRAMA DE PRODUCCIÓN – PLAN MINERO PND 2013.....	8
TABLA 3-2 TOTAL RESERVAS MINERAS	9
TABLA 4-1 RESUMEN DE EXPERIENCIAS DE CAMIONES SUBTERRÁNEOS SEMIAUTÓMATAS.....	19
TABLA 4-2 RESUMEN DE EXPERIENCIAS DE AUTOMATIZACIÓN DE LHD	20
TABLA 4-3 VENTAJAS DE AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS LHD	21
TABLA 4-4 DESVENTAJAS DE AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS LHD.....	22
TABLA 5-1 ACTIVIDADES PRINCIPALES DEL MÓDULO SA.....	35
TABLA 5-2 RESUMEN DE CAMBIOS EN LA OPERACIÓN DEL LHD.	36
TABLA 5-3 RESULTADOS DE APLICACIONES Y PRUEBAS PILOTO DE LHD SA	37
TABLA 5-4 RESULTADOS DE INDICADORES CLAVES.....	37
TABLA 6-1 CATEGORIZACIÓN DE TÓPICOS EN EQUIPOS SEMIAUTÓNOMOS	41
TABLA 6-2 RESUMEN DEL DIAGNÓSTICO DE LA TECNOLOGÍA.....	50
TABLA 6-3 TABLA COMPARACIÓN SISTEMAS SEMIAUTÓNOMOS EN EQUIPOS LHD	51
TABLA 6-4 RECOMENDACIONES POR SISTEMA DE OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMO.....	54
TABLA 6-5 RECOMENDACIONES POR IMPACTO	55
TABLA 6-6 RECOMENDACIONES POR PROVEEDOR.....	56
TABLA 7-1 VENTAJAS DEL SISTEMA AUTOMINE.....	60
TABLA 7-2 DESVENTAJAS DEL SISTEMA AUTOMINE.....	61
TABLA 7-3 INDICADORES BASE PROYECTO OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMA.....	62
TABLA 7-4 COMPORTAMIENTO EQUIPOS EN OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMA.....	62
TABLA 7-5 RELACIÓN RENDIMIENTO EQUIPO SEMI-AUTÓNOMO Y DISTANCIA.....	65
TABLA 7-6 INDICADORES OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMA.....	67
TABLA 8-1 PROGRAMA VALIDACIÓN DEL MODELO OPERACIONAL SEMIAUTÓNOMO	72
TABLA 8-2 RESUMEN DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	80

CONTENIDO FIGURAS

FIGURA 1-1 ESCALA DE TIEMPO PROYECTOS ESTRUCTURALES.....	4
FIGURA 1-2 EVOLUCIÓN DE PRODUCCIÓN DE GRANDES MINAS SUBTERRÁNEAS.....	5
FIGURA 1-3 EVOLUCIÓN DE LA PROFUNDIZACIÓN DE MINAS SUBTERRÁNEAS	5
FIGURA 3-1 ESQUEMA DE OPERACIÓN ACTUAL DIVISIÓN EL TENIENTE	7
FIGURA 3-2 PLAN MINERO PND 2013	10
FIGURA 3-3 HORIZONTE PRODUCTIVO POR SECTOR.....	10
FIGURA 4-1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN	15
FIGURA 4-2 CONTROL REMOTO A LA VISTA.....	16
FIGURA 4-3 OPERACIÓN TELEOPERADO	17
FIGURA 4-4 OPERACIÓN SEMI-AUTÓNOMA	17
FIGURA 4-5 DIAGRAMA DE ARQUITECTURA AUTOMINE	26
FIGURA 4-6 SISTEMA AUTOMINE Y SUBSISTEMAS – DETALLE DE FUNCIONAMIENTO	27
FIGURA 5-1 DIAGRAMA DE DESARROLLO DEL MODELO DE MINERÍA SUBTERRÁNEA SEMIAUTÓNOMA.....	29
FIGURA 5-2 COMPONENTES CENTRALES DEL MODELO DE MINERÍA SUBTERRÁNEA SEMIAUTÓNOMA.....	29
FIGURA 5-3 MAPA ESTRATÉGICO DEL MODELO OPERACIONAL SEMIAUTÓNOMO (2014-2015).....	31
FIGURA 5-4 FILOSOFÍA OPERACIONAL LHD SA.....	36
FIGURA 7-1 ARQUITECTURA DE AUTOMINE®.....	58
FIGURA 7-2 ESQUEMA DEL ÁREA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	59
FIGURA 7-3 DISPONIBILIDAD POR EQUIPO.....	63
FIGURA 7-4 DESVENTAJAS DEL SISTEMA AUTOMINE.....	63
FIGURA 7-5 RENDIMIENTO EFECTIVO CON SISTEMA AUTOMINE SANDVIK.....	64
FIGURA 7-6 RENDIMIENTO EQUIPOS LHD SA PIPA NORTE 2009-2013.....	65
FIGURA 7-7 COSTO TOTAL OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMA SECTOR PIPA NORTE.....	66
FIGURA 7-8 COSTO M&R LHD SA PIPA NORTE.....	67
FIGURA 7-9 PRODUCCIÓN SECTOR PIPA NORTE (TONELADAS POR DÍA).....	68
FIGURA 7-10 ÁRBOL DE CAUSALIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD OPERACIÓN SEMIAUTÓNOMA.....	69
FIGURA 8-1 PERFIL DE PRODUCCIÓN SUBTERRÁNEA EN CODELCO, PND 2013.....	73
FIGURA 8-2 CRONOGRAMA DE LICITACIÓN Y PUESTA EN MARCHA EQUIPOS AUTÓNOMOS PROYECTOS ESTRUCTURALES.....	77

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. OBJETIVOS ESTRATEGICOS

En materia productiva, la aparición de nuevas tecnologías permite lograr una producción cada vez más eficiente y sustentable del cobre. Esto permite acceder a depósitos minerales que antes no podían ser explotados, y al mismo tiempo cumple con las exigencias de una sociedad cada vez más preocupada por las condiciones socio-ambientales existentes.

Desde el punto de vista de la demanda de cobre, más allá del aumento de consumo de cobre que implica el progreso y el crecimiento de las sociedades, este elemento metálico tiene importantes aplicaciones en nuevas tecnologías que ocuparán un espacio importante en nuestras vidas futuras.

Los desafíos que emprende la División El Teniente tanto en crecimiento como en competitividad, apuntan a ubicarla en el primer cuartil de costos y con ello mantener o incrementar la participación en el mercado, lo cual tiene la ventaja de potenciar el impacto de nuevas tecnologías.

Las acciones para el período 2013 – 2017, de acuerdo a los nuevos lineamientos estratégicos corporativos, se resumen en:

Sustentar el Valor: Iniciativas que nos permitirán liderar el costo y productividad en la industria.

- Reducción de costos y aumento de productividad.
- Transformar la gestión de la División El Teniente
- Asegurar el crecimiento de los sectores productivos en roca primaria.
- Implementación de proyectos en el mediano plazo.

Liderando la Industria: Crecimiento

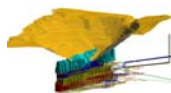
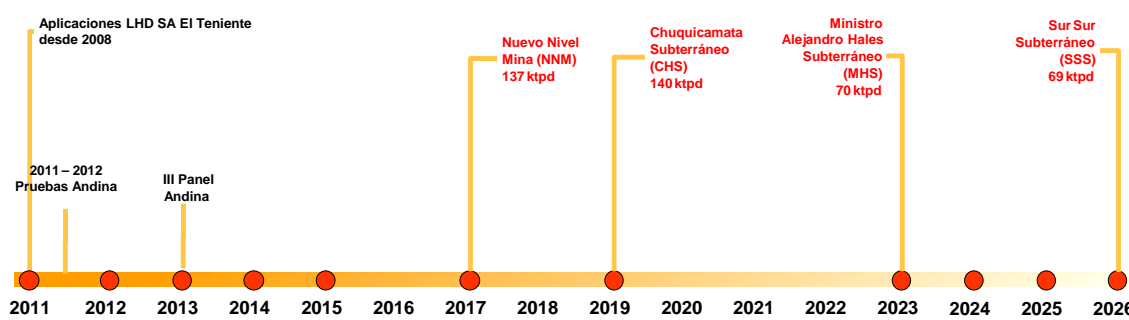
- Anticipación del crecimiento Divisional.
- Asegurar el cumplimiento del plan de ejecución del proyecto Nuevo Nivel Mina y su posterior crecimiento.

Tabla 1-1 Resumen de Objetivos Estratégicos

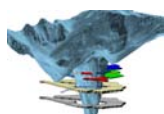
Ámbito	Plazo: 2011-2015 Descripción	Plazo: 2016-2020 Descripción
Accidentabilidad	Récord de 5 años sin fatalidades IFG < 1 al cabo del año 2015	Entre los 5 mejores de la industria de metales base, sin víctimas fatales
Sustentabilidad	Cumpliendo o excediendo la normativa exigida para el medio ambiente	Trabajando en niveles de <i>benchmark</i> en sustentabilidad 20% de uso de ERNC
Producción	Ser el mayor productor mundial de cobre (2,0 MtCuF/año en año 2015)	Codelco continúa liderando la industria mundial del cobre (>2,5 MtCuF/año el año 2020)
Resultados	Más de 30 billones de US\$ de excedentes en los últimos 5 años (años 2011-2015)	Más de 100.000 Mill US\$ en aportes al FISCO desde su creación como empresa
Productividad	Incremento 30% a partir del 2010 (entre el 2011 y 2015)	
Costos	Nivel Inferior 2do cuartil de costos de la industria (C1)	Bajo el segundo cuartil de costos de la industria
Calidad	>90% de cátodos grado A	Más de 93% de cátodos grado A
Procesos	Procesos peligrosos automatizados Plantas metalúrgicas controladas centralmente	Algunos procesos totalmente automatizados, con control a distancia
Proyectos	MMH en producción, excediendo metas Otros proyectos estructurales siendo ejecutados de acuerdo a lo planificado Construcción avanzada de las dos mayores minas subterráneas del mundo	NNM, Chuqui subte y Andina Fase II en producción Nuevos proyectos de expansión adicionales en desarrollo o producción (Ej: Salvador, RT Sulfuros Fase II, San Antonio)
Financiamiento	Nueva política de dividendos acordada con el dueño Deuda < 9.000 Mill US\$ entre el 2011 y 2015	
Recursos Mineros	Mantener nivel 2010	Recursos suficientes para al menos 50 años, a los niveles actuales de producción
Recursos Humanos	Promedio edad trabajadores en línea con la media del sector	Nueva generación de liderazgo posicionada El talento en niveles de <i>benchmark</i>

La implementación de la tecnología semiautónoma está directamente enlazada con los proyectos estructurales el año 2017 para el Proyecto Nuevo Nivel Mina y 2019 Chuquicamata Subterráneo.

Figura 1-1 Escala de tiempo Proyectos Estructurales



- PMCHS = Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea**
- Flota operativa/ total LHD: 32/38
 - Adquisición de 212 equipos en la vida del proyecto.

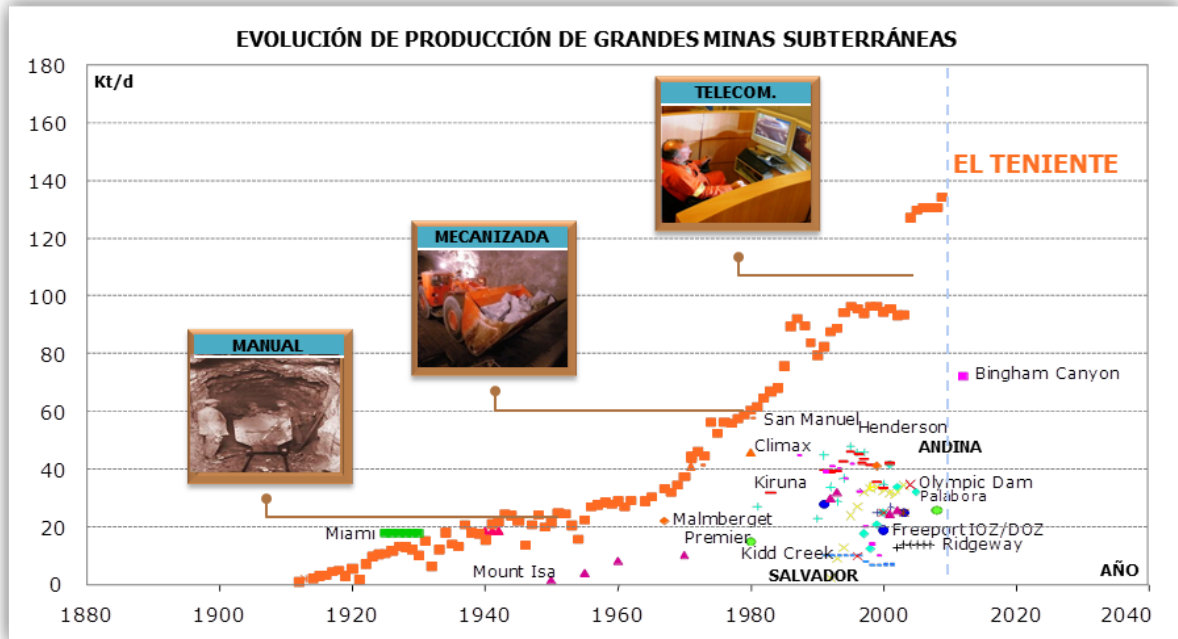


- PNNM = Proyecto Nuevo Nivel Mina**
- Flota operativa/ total LHD: 47/58
 - Flota operativa/ total camiones: 42/52 (60 Ton)
 - Adquisición de 253 LHD en la vida del proyecto.
 - Adquisición de 259 camiones en la vida del proyecto.

fuelle: PND 2012

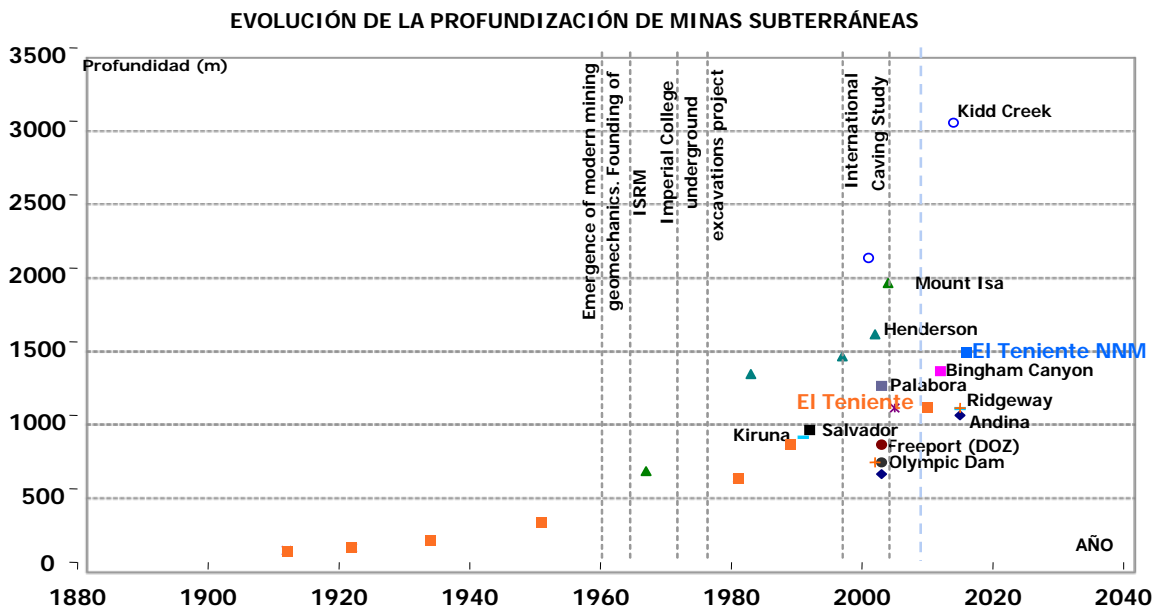
Los quiebres en las operaciones unitarias asociadas al proceso productivo es lento tal como podemos ver en la evolución desde operación manual a mecanizada y la proyección de la explotación está en yacimientos cada vez más complejos y profundos.

Figura 1-2 Evolución de Producción de Grandes Minas Subterráneas



Fuente: E T Brown AC Freng FTSE JKMRC and Golder Associates

Figura 1-3 Evolución de la Profundización de Minas Subterráneas



Fuente: E T Brown AC Freng FTSE JKMRC and Golder Associates

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

Analizar la operación semi-autónoma de los equipos (LHD) de carga, acarreo y descarga en el proceso de extracción en el Minería Subterránea, con la idea de lograr responder y puntualizar de cómo mirar los desafíos futuros en la industria: Profundización de los cuerpos mineralizados, Disminución de ley de minerales, Roca de mayor competencia (condiciones geotécnicas), Altos niveles de producción (menores leyes de mineral), Continuidad del flujo de mineral, Tiempo efectivos de trabajo, Salud y Exposición al riesgo de las personas. Estos son los objetivos planteados para la División El Teniente en su proyecto estructural Nuevo Nivel Mina para poder enfrentar claramente sus desafíos.

Mediante el análisis que se presente en esta tesis, se podrá identificar las brechas en base a los requerimientos del proyecto en el ámbito de: Desarrollo Tecnológico – Modelo de Operación – Diseño, estableciendo línea de acción y recomendaciones para lograr el adecuado desempeño, y de esta forma lograr que este tipo de operación sea técnica y económicamente viable en el corto plazo una alternativa concreta de operación.

El resultado esperado es lograr identificar brechas que permitan alcanzar los rendimientos productivos necesarios para el ritmo de explotación proyectado y su evaluación en el ámbito técnico- económico en base a una operación semi-autónoma. Si bien este tipo de operación se desarrolló en base a un requerimiento por seguridad hoy se debe plasmar en una operación segura y rentable, para ello es necesario capturar todos los beneficios que permite operar en forma semi-autónoma.

Al utilizar este tipo de tecnología en la operación, es necesario obtener el mejor desempeño del activo con el fin de alcanzar la ruta productiva ya trazada que se encuentra plasmada en los proyectos futuros y lograr pasar a una operación más segura y económicamente viable con respecto a una operación manual con este tipo de equipos.

El enfoque estará dado en los ámbitos del: Desarrollo de la Tecnología, Modelo de Operación y Diseño Minero. Analizando posibles líneas de acción para poder alcanzar los desafíos planteados para la División El Teniente en su Proyecto Estructural Nuevo Nivel Mina identificando los beneficios en términos de:

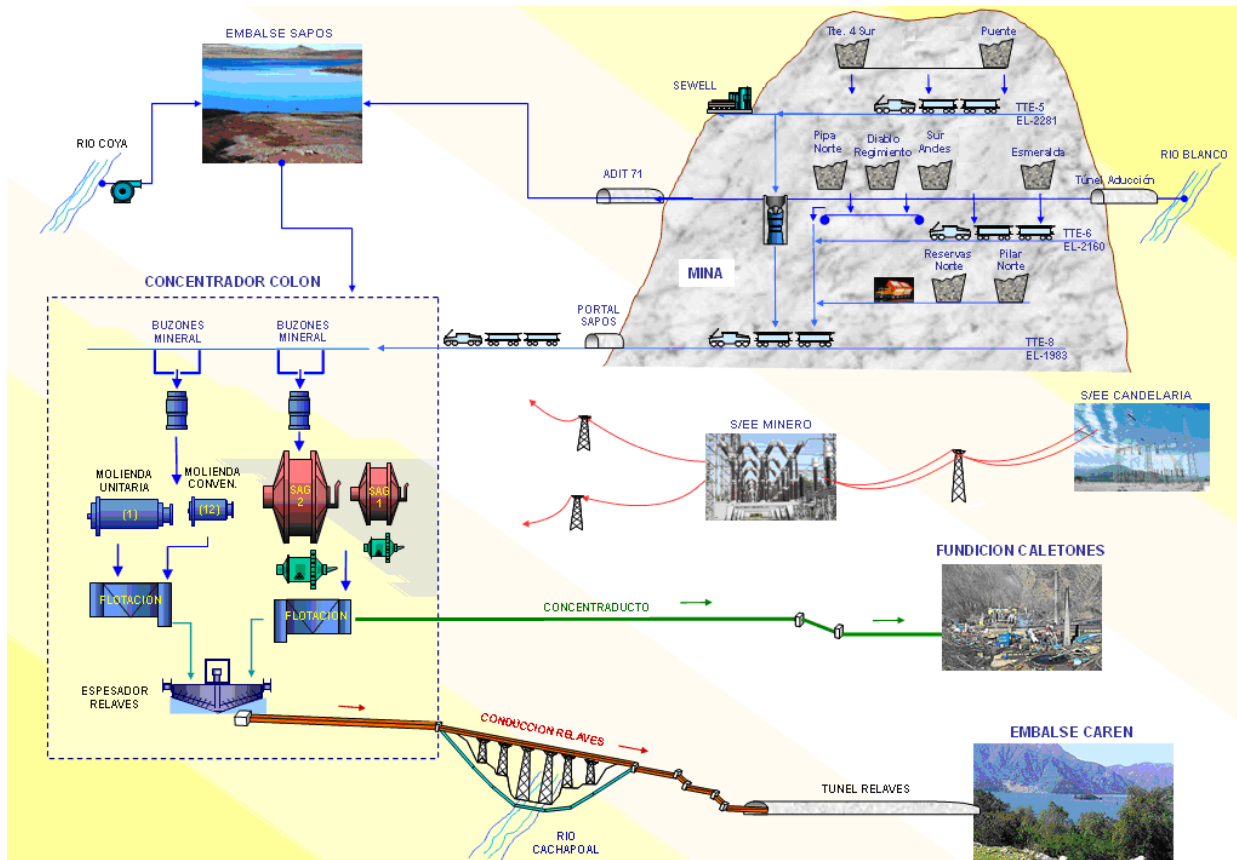
- Seguridad y Salud Ocupacional: Retirar personal expuestas a la operación.
- Productividad: Aumento Horas Efectivas. Captura de Valor.
- Reducción de Costos: Mejoras en el Mantenimiento.
- Rendimientos Operacionales esperados con este tipo de operación en los equipos principales del proceso de extracción.

Los temas anteriormente indicados son parte de los elementos enmarcados en la visión de la operación semiautónoma, por lo tanto se espera obtener las recomendaciones para lograr que esta operación sea técnica y económicamente sustentable, estableciendo las fronteras de esta viabilidad para lograr las metas trazadas.

3. ANTECEDENTES MINA SUBTERRANEA DIVISION EL TENIENTE – CODELCO CHILE

La División El Teniente de CODELCO es un complejo productivo que considera entre sus instalaciones una mina subterránea explotada por métodos de hundimiento, una mina Rajo Abierto, plantas de beneficio de mineral de Sewell y Colón, Fundición de Caletones y las instalaciones de infraestructura propias de una explotación minera a gran escala: Sistema de suministros de agua, energía eléctrica, logística de entrada y salida de productos, manejo de residuos y desechos industriales, entre otros. La siguiente figura ilustra las Principales áreas operacionales del complejo El Teniente.

Figura 3-1 Esquema de Operación Actual División El Teniente



El plan de producción asociado al Plan de Negocio Divisional del 2013 ha sido formulado de manera robusta y flexible, balanceando metas desafiantes y una promesa con mayor probabilidad de cumplimiento.

Para ello se identificaron los principales factores de riesgo e incertidumbres que enfrenta el crecimiento de la mina en el corto y mediano plazo y se incorporaron las principales desviaciones que han afectado al plan, relacionadas con siniestralidades geotécnicas y atrasos en puesta en marcha de proyectos.

- Agotamiento de las reservas sobre la cota 2.300 m.s.n.m. de la mina subterránea en el año 2014, que alimentan el concentrador de Sewell.
- Continuidad operacional de Sewell hasta el año 2018, procesando los recursos superficiales provenientes del proyecto Rajo Sur, con ritmos máximos mina de 20kt/d.
- Crecimiento en torno a las 180 kt/d el año 2025, mediante el Nuevo Nivel Mina y la posterior continuidad del Nivel Profundo.
- El desarrollo del negocio fundición en concordancia con la concreción de proyectos de sustentación ambiental, optimización productiva y con el cumplimiento de las regulaciones ambientales aplicables, según Anteproyecto de Norma de Emisión para Fundiciones publicado en el Diario Oficial el 2 de Julio de 2012.

La cartera de productos comerciales de cobre de la División, se circunscribe a:

- Metal Blanco y Barra Anódica el año 2013.
- Concentrado Propio y Concentrado MVC hasta año 2017
- Sólo cátodos y ánodos a partir del 2014

El plan de producción mina del PND 2013 se extiende hasta “**Life of Mine**”, período de planificación de todos los recursos económicos.

Tabla 3-1 Programa de Producción – Plan Minero PND 2013

Plan de Negocio y Desarrollo 2013	UN	Total	2013	2014	2015	2016	2017	2018 a 2028	2029 a fin
Mineral ROM	Mt	4.235	49	49	50	51	51	609	3.375
Ley de Cobre	%	0,83	0,95	0,01	0,95	0,96	0,90	1,00	0,79
Ley de Molibdeno	%	0,023	0,021	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024	0,022
Ley de Arsénico	ppm	66	83	81	73	72	86	75	63

3.1. RESERVAS MINERAS

Las reservas del plan minero del Plan de Negocio y Desarrollo 2013 en un horizonte de planificación comprendido entre los años 2013 y 2084 totalizan 4.235 millones de toneladas de ley media de cobre de 0,83% y 0,023% de molibdeno. En la siguiente tabla se presenta un resumen de su clasificación.

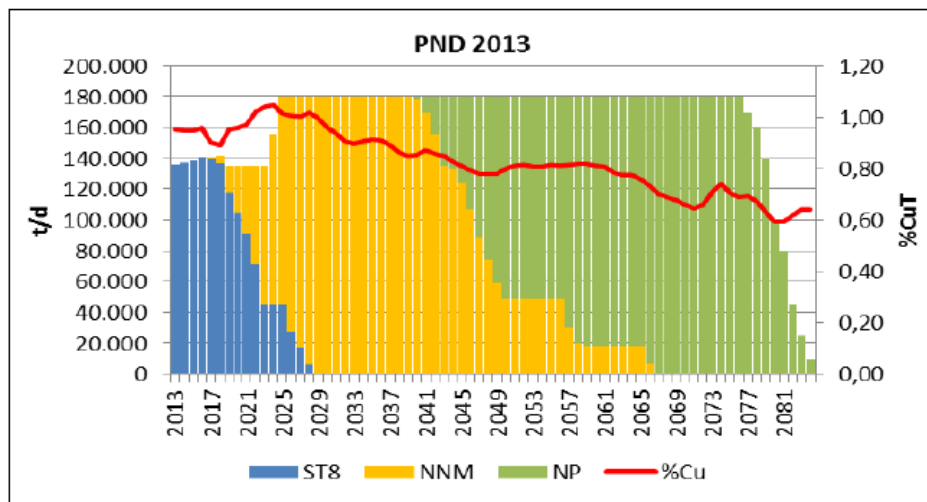
Tabla 3-2 Total Reservas Mineras

Sector	Mineral (Mt)	Cobre (%)	Cobre Fino (Mt)
Probadas	735	1,08	8,0
Probables	802	0,90	7,3
Recursos Minerales	2.192	0,78	17,1
Total Insitu	3.730	0,87	32,3
Total Mineral Quebrado	505	0,57	2,9
Total Plan	4.235	0,83	35,2

Las reservas incluyen los sectores actualmente en operación y proyectos nuevos (Dacita, Pacífico Superior) ubicados por sobre el nivel Teniente 8, y los proyectos Nuevo Nivel Mina (cota 1.880) y Nivel Profundo (cota 1.480).

El siguiente gráfico resume el plan de producción mina por agrupaciones de sectores en el tiempo. En la producción de sectores y proyectos ubicados sobre la cota del nivel Teniente 8 (ST8) se incluye el proyecto Rajo Sur. El crecimiento en torno a las 180 kt/d mediante producción únicamente subterránea, básicamente con el aporte del Proyecto Nuevo Nivel Mina y la posterior continuidad del Nivel Profundo.

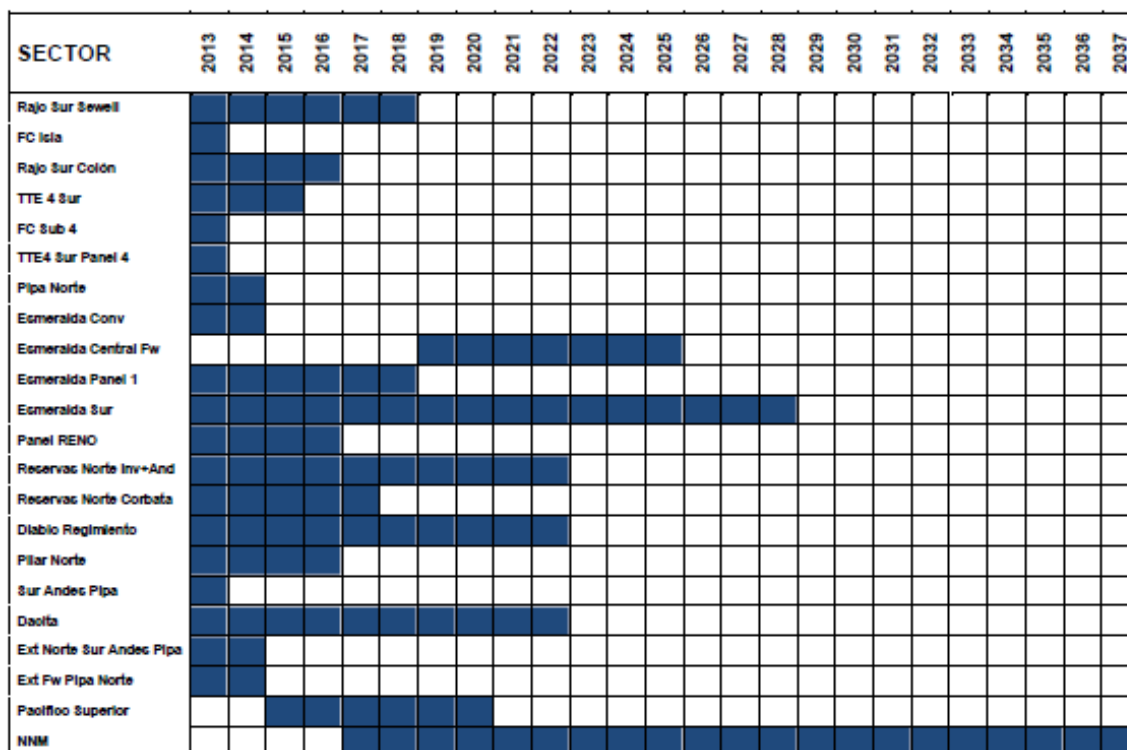
Figura 3-2 Plan Minero PND 2013



3.2. OPERACIÓN ACTUAL

Para los sectores considerados en las operaciones actuales y futuras, la siguiente figura muestra su periodo productivo, en una ventana de planificación de 25 años.

Figura 3-3 Horizonte Productivo por Sector



A continuación se entrega una breve descripción de los sectores en operación y de los proyectos que contempla el Plan de Negocio y Desarrollo de la División El Teniente, cuya planificación en el tiempo queda plasmada en el plan minero del PND 2013.

Minas en Operación:

- **Sector Teniente 4 Sur:** Sector en etapa de agotamiento. Se contempla su cierre el 2015. Tiene toda su infraestructura principal desarrollada. Alimentará a Colón hasta el final de su vida. Además de la producción en su nivel de producción propiamente tal, se considera la explotación de 2 subsectores, ubicados a cota nivel de ventilación. Panel 4 y Front Caving Sub 4.
- **Sector Esmeralda:** Sector conformado por áreas que se encuentran en agotamiento y que dan sustento a la producción actual del sector (frente actual). Considera para su crecimiento la explotación de la zona denominada Esmeralda Sur que se inició el año 2011, con una estrategia de explotación mediante bloques. También considera la incorporación del sector Panel 1 a partir del año 2012, ubicado 14m bajo la cota del nivel de producción actual, permitiendo recuperar reservas postergadas de la zona central. También considera la explotación desde el año 2019 de la zona denominada Esmeralda Central Fw (al sur de frente actual y al norte de bloque El sector así conformado, tiene contemplado alcanzar una producción máxima de 45.000 t/d en el año 2022 y una vida útil hasta el año 2028.
- **Sector Reservas Norte:** Este sector, tiene planificado alcanzar una capacidad productiva máxima de cerca de 42.000 t/d durante los años 2014 y 2015. El sector Reservas Norte está conformado por los subsectores Invariante, Andesita y Corbata además de un panel, emplazado a una cota inferior en 18 m al nivel de producción.
- **Sector Pilar Norte:** Sector ubicado al Sur del sector Reservas Norte. Se encuentra en etapa de crecimiento y tiene contemplado alcanzar una tasa de producción de 11.250 t/d en el último año de su vida productiva que es el año 2016, debido a que el año 2017 es afectado por la interacción del Proyecto Nuevo Nivel Mina.
- **Sector Diablo Regimiento:** Sector en etapa de crecimiento. Tiene dos salas de chancado en operación. Se espera alcanzar el año 2014 su producción máxima del orden de las 28.000 t/d. Los LHD que se ocupan en el sector son los más grandes de la mina (13 yd³).
- **Sector Pipa Norte:** Sector en etapa de agotamiento, con producción entorno a 4.500 t/d. Este sector también ocupa LHD de 13 yd³.
- **Sector Extensión Fw Pipa Norte:** Sector que corresponde a una ampliación al Fw de Pipa Norte. Utiliza LHD de 13 yd³ y envía mayoritariamente su producción a chancador de Pipa Norte. La excepción es la calle que limita con Sur Andes Pipa que usa la infraestructura de este sector y palas de 7 yd³.
- **Sector Sur Andes Pipa:** Emplazado a una cota superior a proyecto Dacita, ha servido como experiencia para la explotación de este tipo de roca. Este es un sector de corta vida y finalizará su producción el año 2013. Utiliza LHD de 7 yd³, y la infraestructura del ya agotado Quebrada Teniente.
- **Extensión Norte Sur Andes Pipa:** El sector se ubica al Norte del sector Sur Andes Pipa, con el mismo método de explotación e infraestructura que este

último. Tiene contemplado producir hasta el año 2014, y aportar un máximo de mineral a razón de 4.650 t/d aprox.

- **Rajo Sur:** El sector se ubica al sur del yacimiento El Teniente y explota reservas mediante el método Rajo Abierto en el entorno del cráter generado por la minería subterránea. Tiene contemplado iniciar producción este año 2012 y enviar su mineral mayoritariamente a la planta de molienda de Sewell, permitiendo la continuidad operacional de ésta hasta el año 2018. La tasa máxima de producción será de 20.000 t/d.

Proyectos Mineros:

- **Proyecto Dacita:** El proyecto se ubica al Norte de la Pipa Braden y al Oeste de la mina Reservas Norte, caracterizado por la presencia mayoritaria de roca primaria del tipo Pórfido Dacítico. Este proyecto tiene contemplado una puesta en marcha el año 2013 y alcanzar una capacidad de régimen de 17.000 t/d, permitiendo suplir producción de sectores que se encuentran en etapa de agotamiento. Su vida productiva se extiende hasta el año 2022 debido a interacción con el Proyecto Nuevo Nivel Mina. La cota de sus niveles productivos, son similares a los de Reservas Norte e incorpora un chancador interior mina de manera de aportar mineral de granulometría fina al sistema del FFCC Tte. 8.
- **Proyecto Pacifico Superior:** El proyecto se ubica el Oeste de la Pipa Braden y se caracteriza por contener mayoritariamente roca secundaria del tipo CMET y Brecha. Tiene planeado un método de explotación del tipo Panel Caving. Su puesta en marcha está contemplada para el año 2015 y alcanzar una capacidadde régimen de 15 kt/d, permitiendo suplir producción de sectores en etapa de agotamiento. Su vida productiva se extiende hasta el año 2020.
- **Proyecto Nuevo Nivel Mina:** El proyecto permitirá asegurar la competitividad y continuidad operacional de la División El Teniente en el largo plazo. Recuperará reservas mediante el método Panel Caving con cota de hundimiento 1.880. Su inicio de producción está contemplado para el año 2017. Permitirá reemplazar sectores en agotamiento. Sus 12 primeros años se encuentra en etapa de crecimiento, para luego sustentar toda la producción de la División El Teniente a una tasa de 180 kt/d. Su vida productiva está estimada hasta el año 2066.
- **Proyecto Nivel Profundo:** Proyecto de continuidad de la División, considera entrar en producción en el año 2040 mediante un método subterráneo con cota de hundimiento 1.480. Este proyecto permitirá mantener la capacidad de 180 kt/d en el largo plazo. Su vida productiva está estimada hasta el año 2084.

4. ESTADO DEL ARTE EN LA AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS DE EXTRACCIÓN (LHD)

Una descripción del estado del arte de las tecnologías para la extracción de mineral en minería subterránea, podemos encontrar algunos avances tecnológicos en el área de automatización en minería subterránea.

En relación con la automatización de operaciones encontramos:

- Monitoreo: Inspección o vigilancia de un sistema para conocer su estado.
- Control: Análisis, síntesis y acciones necesarias para modificar un proceso o mantenerlo dentro de un estado predeterminado.
- Automatización: Realización de actividades específicas sin intervención directa del ser humano.
- Tele-comando: Operación a distancia de un equipo.

En general los actuales proveedores de equipos para la minería subterránea disponen de diferentes niveles o grados de Automatización según los requerimientos deseados. Las versiones de los equipos permiten clasificar estas categorías de automatización en:

- Operación manual instrumentada.
- Operación semi-automática, con operación a distancia.
- Operaciones totalmente automáticas controladas por un computador.

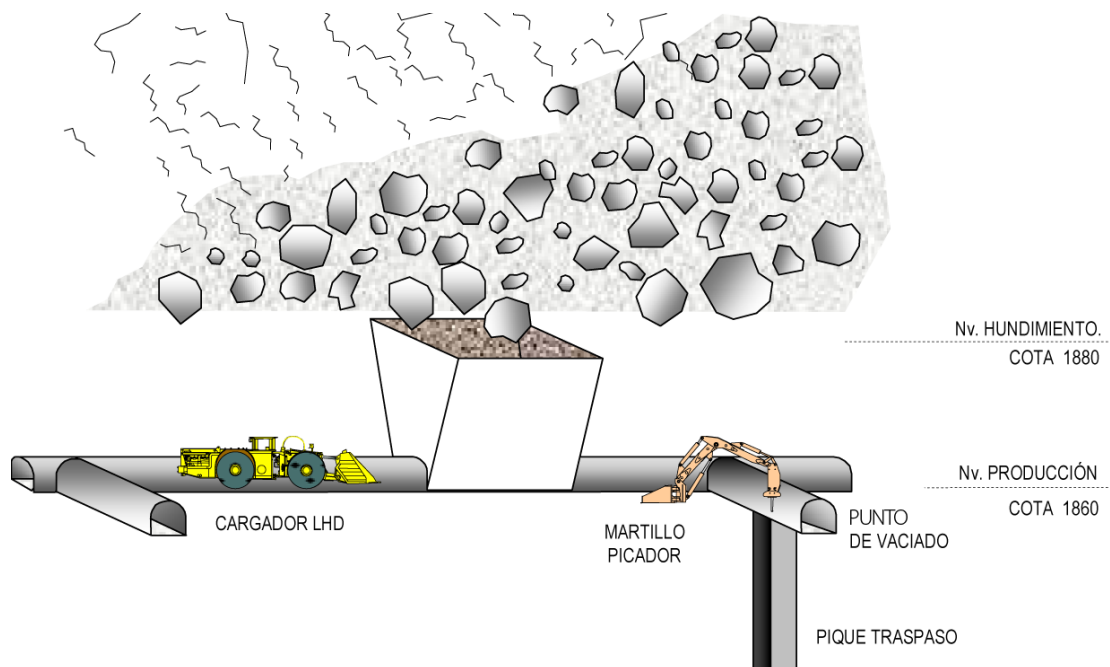
Todos estos niveles pueden representar la mejor solución para una mina o faena en particular, dependiendo de sus requerimientos, de la tecnología y capacitación de su personal, de las operaciones y áreas involucradas, que permitan un beneficio al proceso de extracción de mineral.

Proceso de Extracción de Mineral

Los equipos LHD se utilizan para realizar el proceso de extracción de mineral en los niveles de producción, esta operación repetitiva consiste en las tareas de: Cargar, Transportar y Descargar roca mineralizada a lo largo del nivel. El carguío se realiza en los puntos de extracción, donde roca fragmentada mediante la utilización de explosivos es transportada por el LHD a través de las galerías hasta los puntos de vaciado donde el mineral es traspasado por gravedad a los siguientes niveles del ciclo de producción. Durante todo el proceso el LHD y el operador se mueven a lo largo de los túneles, típicamente de cientos de metros de largo, transportando el mineral, y a mayor cantidad de repeticiones de este ciclo que sean completadas durante un turno, mayor sería la producción.

Se decide la operación remota con LHD en los puntos de extracción con riesgo, donde el operador debe descender del vehículo y operar a distancia mediante control remoto el LHD, tarea que genera problemas debido a que el operador debe mantener el equipo a la vista y por lo tanto los riesgos persisten y al mismo tiempo aumentan los tiempos de ciclo. Para poder prevenir esto, en la actualidad se utiliza el carguío tele-operado de los equipos LHD desde la superficie.

Figura 4-1 Diagrama del Proceso de Extracción



La División el Teniente es pionera en la utilización de equipos semi-automáticos para la extracción de mineral, debido a que posee en operación el sector Pipa Norte, permitiendo que los operadores solo deban intervenir el ciclo para cargar mineral con LHD en los puntos de extracción, por lo que la experiencia obtenida es un pilar fundamental para el análisis.

La implementación de esta tecnología en División el Teniente nació como solución a los problemas de seguridad y calidad de vida de los trabajadores, como también para contar con un equipo robusto capaz de enfrentar las exigencias que demanda el mineral primario para ser extraído, en función de una mayor productividad que, como resultado, permita un mayor tiempo de operación en comparación con los equipos manuales (con operador a bordo).

A la fecha se han observado grandes avances en el tema de la seguridad y calidad de vida de las personas, pero donde todavía la semi-automatización posee debilidades es en la productividad, principalmente a causa del bajo tiempo de utilización que alcanzan los equipos durante el turno, lo que no ha permitido cumplir con lo esperado.

La Operación Manual

La operación manual de los LHD es la forma más común de movimiento de mineral en una mina subterránea. El operador permanece en la cabina en la parte superior del equipo durante todo el ciclo de carga, acarreo y descarga. La posición lateral de la cabina hace que sea posible que el operador tenga una clara línea de visión cuando el vehículo está en movimiento hacia adelante o hacia atrás. Dado que el control remoto ofrece la percepción sensorial limitada, la operación manual es más rápida que el mando a distancia y tele-remota. Las desventajas de la operación manual incluyen la falta de seguridad, la fatiga del conductor y los errores humanos básicos.

Operación con Línea de control remoto a la vista

Una etapa inicial de la automatización se generó en operar el equipo con un volante a la izquierda por el mando a distancia mientras se mantiene que a la vista. Esta técnica es una práctica común en las zonas no fortificadas. Un equipo operado con control a la vista el operador en todo momento, el operador está cerca y se puede ver el LHD.

Una vez cargado el equipo, el operador sube de nuevo a la máquina para conducir manualmente hasta el punto de descarga o en su defecto acumula la roca es zona cercana para ser retirada posteriormente. Este procedimiento es lento debido a la interacción constante entre la operación manual y remoto. También es improductivo, ya que el operador tiene una visión limitada de la operación de carga hace que el balde es difícil de llenar. Lo más importante, es que no es seguro ya que el operador permanezca cerca del vehículo controlado a distancia.

Figura 4-2 Control Remoto a la Vista



Operación con Control remoto de Tele-Operado

Tele-operación remota es el siguiente paso en la automatización. En este caso existen cámaras de vídeo que están instalados en los LHD para proporcionar al operador remoto una mejor visión hacia adelante y hacia atrás. El LHD es operado en forma remota durante el ciclo de carga/ transporte / descarga. El operador puede estar ubicado en un ambiente seguro y cómodo una larga distancia desde el vehículo, pero todavía puede funcionar un solo vehículo a la vez. La visión no siempre es clara, lo que implica que es difícil para el operador de maniobrar la máquina.

Debido a la limitada percepción sensorial de los operadores que operan los equipos en forma remota, la velocidad de los vehículos es inferior, y esto se traduce en disminución de la productividad. Aunque la operación de tele-remota ha permitido mejorar la seguridad, los costos se incrementan debido a los gastos adicionales de la infraestructura necesaria para la tele-operación.

Figura 4-3 Operación Teleoperado



Operación Sistema Semi-Autónomo

Los operadores siguen siendo necesarios para controlar vehículos y deben participar en algunos puntos durante el ciclo de carga, pero pueden operar uno o varios a la vez a partir de un entorno seguro, cumpliendo el objetivo de operar fuera de la mina.

Dado que este tipo de equipos se siguen fielmente instrucciones programadas, la administración tiene la flexibilidad para controlar el rendimiento del equipo e influir en su desgaste. Es útil para evaluar en los equipos automatizados indicadores clave de rendimiento (KPI), éstos determinarán los aspectos positivos y los aspectos negativos de los equipos automáticos. La automatización no mejora los indicadores clave de rendimiento, los tiempos de ciclo para el transporte de los equipos pueden aumentar pero su la velocidad se reduce por razones de seguridad.

Sin embargo, el aspecto de aumento productivo puede ser mejorado a través de los quiebres que se producen en los cambios de turno. Hay que considerar que para la operación de los equipos automáticos se debe aislar el sector por un sistema de barrera física. Cualquier incumplimiento en el sistema se detendrá inmediatamente el sistema. Podría indicarse que para la gran minería es posible obtener beneficios más importantes de la instalación de un sistema automático, ya que la producción puede aumentar en aplicaciones de ciclo a gran escala.

Figura 4-4 Operación Semi-Autónoma



4.1. EXPERIENCIA DE AUTOMATIZACION DE EQUIPOS SUBTERRANEOS.

Debido a su amplio uso en la industria de la minería subterránea, equipos LHD son fabricados por un amplio número de empresas. Los más conocidos para la extracción son Atlas Copco, Sandvik y Caterpillar.

Cada proveedor ofrece una serie de diferentes modelos de máquinas con diferentes capacidades y tamaños. El primer proveedor en introducir sistemas automatizados para la minería subterránea fue Sandvik. Hoy en día, la investigación y el desarrollo se realiza principalmente por los fabricantes.

En la actualidad la empresa Sandvik ofrece un sistema semi-automático, otros fabricantes han desarrollado sistemas semi-automáticos similares. Hoy en día cada proveedor es dueño de su sistema no siendo esto la condición óptima como modelo de negocio de operación.

En automatización de camiones subterráneos, las experiencias internacionales, han sido introducidas a partir del año 2005, en la Mina Finsch, ubicada en Sudáfrica. Esta mina subterránea produce diamantes, con una producción actual de 16 kt/d, estimándose que estará en operación hasta el año 2014.

Esta operación fue desarrollada por el fabricante Sandvik, utilizando el Sistema Automine. En la actualidad la operación automatizada es realizada mediante siete camiones Toro 50, de 50 t de capacidad.

Las principales características del sistema y los resultados obtenidos son:

- Utilización: Sobre 6.000 horas de operación al año por camión.
- Vida útil de neumáticos: sobre 5.000 horas cada neumático.
- Ciclo productivo: Ciclo de recorrido de 1 km, anualmente se recorren 10.000 km.
- Monitoreo del proceso en tiempo real: Se dispone de sistema de video y terminal de comunicación móvil.
- Velocidad promedio: 25 km/h con posibilidad de aumentar hasta 30 km/h, dependiendo de la sección del túnel. (Se utilizan túneles con secciones de 4m x 4m y las dimensiones en los túneles de áreas nuevas son 4,5m x 4,5m, espaciados cada 30m.

Por otra parte, el Sistema AutoMine está siendo aplicado, desde el mes de Junio de 2007, en dos camiones Toro 40 en la Mina Williams, de propiedad compartida entre las empresas Barrick y TeckCominco. Esta mina es de oro y está ubicada en Canadá.

Estos dos camiones autónomos transportan alrededor del 60% del mineral que la mina produce, alcanzando una capacidad de transporte entre 200 y 250 t/h, con lo cual, ha duplicado la capacidad de transporte, respecto a la operación manual, utilizando dimensiones de 4,5m x 4,5m.

Los principales resultados obtenidos en estas operaciones automatizadas, son las siguientes:

- Mayor seguridad en operaciones subterráneas.
- Reducción de costos de operación y mantención.
- Mayor productividad.
- Menor desgaste del equipo.

Por otra parte, la Mina Brunswick de propiedad de Noranda, ha utilizado desde el año 1997 un sistema de teleguiado de equipos LHD y posteriormente aplicó en camiones el año 2001. Este sistema se denomina SIAM (Integrated and Automated Mining) el cual permite:

- Tele-operación (tele-comando) asistida por video de LHD (Control Remoto de Línea Visual).
- Carga automática en LHD.
- Teleguiado de LHD y Camiones.

Tabla 4-1 Resumen de Experiencias de Camiones Subterráneos SemiAutomatas

	Mina - Propietaria	Faena	Sistema de Automatización
Sudafrica	Finsch- Mina de diamantes de Beers	Camiones Automáticos Flota 9 camiones y con 7 operativos. Modelo Toro 50 Inicia 2005.	Sandvik con Sistema Automine.
Canadá	Williams- Mina de oro de Barrick y TeckCominco.	Camiones Automáticos Flota de 2 camiones Toro 40 Inicia 2007	Sandvik con Sistema Automine
Canadá	Brunswick- Mina de propiedad de Noranda.	Camiones teleguiados Flota 2 camiones operativos. Wagner MT 436 B. Inicia Junio 2001	Sistema de equipos teleguiados. SIAM. de Atlas Copco.

En la experiencia internacional de automatización de LHD, las empresas fabricantes Sandvik, Caterpillar y Atlas Copco, cuentan con soluciones que han sido implementadas en diferentes 19 proyectos mineros, tal como se muestra en la siguientes tabla.

Tabla 4-2 Resumen de Experiencias de Automatización de LHD

Pais	Empresa	Mina	Año inicio	Proveedor
Finlandia	Sandvik	Tempere	1999	Sandvik
	InmetMining	Pyhasalmi	2005	
Chile	Codelco	Pipa Norte	2004	
		Diablo Regimiento	2005	
		Pilar Norte	2010	
Sudáfrica	De Beers	Finsch	2007	
Canadá	Barrick/ TeckConmico	Williams	2007	
Australia	Xstrata	Mount Isa	2008	
Kazajastán	Kazakhmys	Nurkazgan	2009	
Australia	BHP Billiton	OlympicDam	2000	Caterpillar
	Río Tinto	North-parkes		
Australia	Leviatán Resources	Stawell	2005	
Suecia	LKAB	Malmberget	2007	
Indonesia	Freeport		2007	
Australia	Byrnescut	NewmontMiningJundee	2007	
Australia	Xstrata	Mount Isa George Fischer	2007	
Australia	Zinifex	Rosebery	2007	
Chile	Codelco	Andina	2011	
Canadá	Noranda	Brunswick	1997	Atlas Copco
Australia	Outokumpu	Kemi	2007	
Chile	Codelco	Andina	2011	

Se constata que las experiencias efectuadas han sido abordadas en escala reducidas de flotas tanto de LHD SA y Camiones Autónomos. A nivel internacional las aplicaciones de mayor dimensión son de 7 equipos en North Parkes de Río Tinto en Australia. En cuanto a Camiones Subterráneos Autónomos las aplicaciones pilotos industriales son aún menores en cantidad, en donde se tienen tres experiencias, siendo la mayor Finsch en Sudáfrica con una flota de 7 camiones, la cual comenzó en el año 2005.

En resumen este mercado está orientado principalmente a aplicaciones de carácter de seguridad en donde la operación manual presenta un alto riesgo de operar y con menores exigencias productivas.

4.2. ANALISIS COMPARATIVO DE OPERACIÓN MANUAL Y EQUIPOS LHD SA.

A continuación se presentará un resumen de las principales ventajas y desventajas de la operación de equipos semi-automatas y la operación manual con conductor a bordo, los principales parámetros de operación que se han obtenido en la División El Teniente y Pruebas Piloto de la automatización de LHDs.

Tabla 4-3 Ventajas de Automatización de Equipos LHD

Aspecto	Ventaja	Causa
Costos	Disminución del daño a los equipos por exigencias más allá de su capacidad de diseño.	Costo de la tecnología de automatización incorporada en el equipo (On-Board) y en terreno (On-Site).
	Menor costo de operación del proceso	Menor cantidad de mano de obra de operación (un operador para dos o más equipos)
	Reducción de consumo de energía	Sistemas automatizados pueden incorporar programas que minimicen el consumo energético.
Productividad	Aumento de la utilización y eficiencia del equipamiento de producción	Eliminación de pérdidas operacionales por necesidades fisiológicas y limitaciones físicas del operador.
		Operación continua y administración sistemática de las interferencias.
	Mayor disponibilidad	Detección temprana de fallas mediante el monitoreo en línea y en tiempo real de variables asociadas a la operación y en mantenimiento del equipo.
	Mayor productividad del proceso	Un operador controla en forma remota dos o más equipos.
		Incremento de la cantidad de producto (metros, toneladas, etc.) por unidad de tiempo.
	Mejor rendimiento	Mejor gestión de las interferencias por asignación dinámica que evita congestión en LHD y Camiones.
	Mejoramiento de los procesos de control	Disponibilidad en línea y en tiempo real de información de los procesos automatizados.
	Optimización de procesos	Automatización de operaciones complementarias.
Calidad del Proceso	Minimización de errores asociados a trabajos repetitivos.	No se requiere operador a bordo
	Mejores condiciones de trabajo en general	Eliminación de exposición del operador a bordo a ambientes de trabajo de altos niveles de ruido, vibraciones, temperaturas, polvo y otras.
Calidad de Vida del personal	Mayor Seguridad Laboral	Disminución de exposición al riesgo del personal.
	Nula exposición a fuentes causantes de enfermedades profesionales	Operación remota de equipos (telecomando)

Tabla 4-4 Desventajas de Automatización de Equipos LHD

Aspecto	Desventaja	Causa
Inversión	Inversión inicial superior respecto a sistema manual.	Costo de la tecnología de automatización incorporada en el equipo (On-Board) y en terreno (On-Site).
Mano de Obra	Costo de Capacitación y entrenamiento de personal que opera y mantiene las nuevas tecnologías.	Falta de personal capacitado y/o entrenado en nuevas tecnologías. Resistencia al cambio del personal que opera y mantiene tecnología operada en forma manual.
	Mayor costo de la mano de obra de mantenimiento.	Mano de obra de mayor calificación para mantener nueva tecnología.
Costos	Dependencia tecnológica (hardware y software)	Optar por uno de los sistemas de automatización disponibles en el mercado

4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AUTOMATIZACION

La implementación de un sistema automatizado posee ciertas ventajas y desventajas:

VENTAJAS

- Aumento de la seguridad laboral, al disminuir la exposición al riesgo del personal.
- Nula exposición a fuentes que provocan enfermedades profesionales.
- Mejoran los procesos de control, se obtiene información en línea de los procesos automatizados.
- Reducción de gastos por consumo de energía, ya que pueden incorporar programas de eficiencia energética.
- Optimización de procesos.
- Reducción de gastos de mano de obra.
- Disminución daños a equipos por mala operación.
- Se espera aumento de la productividad en casos de ciclos amplios.
- Minimización de errores por trabajos repetitivos.

DESVENTAJAS.

- Inversión inicial puede ser superior con respecto a un sistema manual.
- Falta de personal capacitado en estas nuevas tecnologías.
- La total Automatización no es una solución por sí sola, requiere ser evaluada para definir su nivel o grado de aplicación.
- Resistencia al cambio asociada a la confiabilidad del sistema.
- Dependencia tecnológica asociada a la oferta de cada proveedor.

La incorporación de esta metodología en la extracción de mineral se enfoca en los focos principales del negocio de largo plazo que son: costo, productividad y calidad de vida del personal lo que permitirá una operación sustentable a largo plazo.

4.4. ANTECEDENTES SOBRE NAVEGACION EN MINERIA SUBTERRANEA

En minería subterránea, los vehículos LHD son típicamente usados para transportar roca mineralizada desde los puntos de extracción hasta los puntos de vaciado en los niveles de producción. Una serie de razones han llevado al deseo de automatizar estos equipos, consiguiendo así poder eliminar la presencia de un operador a bordo del vehículo.

- Primero, una mina generalmente no ofrece las mejores condiciones ambientales para las personas.
- Segundo, la naturaleza de la tarea de extracción de mineral es tal que el vehículo y el operador están constantemente sometidos a riesgos como ser golpeados o aplastados por derrame de rocas, en especial a la hora de realizar el carguío, tarea que es desarrollada en áreas inseguras.
- Tercero, un vehículo LHD automatizado podría permitir una reducción de los costos de operación y lograr un aumento de la productividad de los equipos.

- Cuarto, el control automático de un LHD puede llevar a una disminución del esfuerzo mecánico que realizan los equipos, lo que causa un rápido desgaste de los componentes, por lo que al disminuir los esfuerzos mecánicos se lograría una reducción de los costos de mantenimiento.

En algunas minas la tele-operación es utilizada para aumentar la seguridad, pero en la mayoría de estos casos se ha observado una reducción de la productividad de los equipos debido a que el operador remoto no logra conducir el vehículo a la rapidez y al ritmo de trabajo que se obtiene a bordo de los equipos, además los costos de mantención tienden a aumentar con la tele-operación dado el grado tecnológico que requiere esta operación.

Estos hechos han llevado al deseo de automatizar el ciclo completo de trabajo desarrollado por los vehículos LHD, o al menos usar una combinación semi-automática, es decir desarrollar algunas tareas automáticas y otras tele-operadas dada las tareas asociadas a la explotación minera. Debido a que la mayor parte del ciclo de trabajo de un LHD se utiliza en la tarea de transportar el mineral, es esta tarea la que tendría un mayor beneficio de automatizar.

Para dar respuesta a las exigencias necesarias para cumplir con el objetivo, es necesario conseguir exitosamente los fundamentos de la navegación autónoma que son:

- Percepción - Sensar el entorno.
- Localización - Ubicarse así mismo dentro del entorno.
- Cognición - Planificación de ruta.
- Control de movimiento - Ejecutar rutas eficientes en el entorno.

La percepción involucra recoger información del ambiente, acción desarrollada por el equipo mediante la utilización de sensores, además de la interpretación de los datos con la finalidad de obtener información con significado para el sistema de navegación. Los seres humanos confiamos en la visión para percibir el mundo y los equipos también pueden ser provistos de esta habilidad mediante el uso de cámaras. Además de la visión, los equipos pueden confiar en otros sensores como exploradores de rango para percibir la distancia a objetos, o giroscopios para determinar la orientación.

La localización consiste en la estimación del estado del equipo, el estado de un equipo contiene múltiples variables en un vector que define inequívocamente su ubicación en el ambiente. Para el equipo el vector de estado comúnmente definirá la posición y orientación de él equipo

La cognición corresponde a la etapa de la toma de decisiones o planificación de ruta y consiste en que una vez que se localización o se tiene cierto grado de certeza sobre la posición y orientación del equipo, es necesario planificar como este se moverá para llegar a su objetivo.

El control de movimiento involucra el determinar cómo operaran los actuadores para seguir un determinado recorrido o trayectoria. Esto es dependiente del diseño y de la configuración de los actuadores del equipo.

4.5. NAVEGACION EQUIPOS LHD EN MINERIA SUBTERRANEA

Una serie de razones han llevado al deseo de automatizar los equipos LHD, con el objetivo de evitar la presencia de un operador a bordo del vehículo, principalmente por motivos de seguridad y calidad de vida de los trabajadores a causa del aumento considerable de los riesgos en el proceso de extracción de mineral, debido a la naturaleza del proceso, en especial a la hora de realizar la tarea de carguío. Todo esto buscando el fin de lograr un aumento de la productividad del parque de equipos.

Una gran cantidad de soluciones han sido sugeridas y evaluadas para automatizar la tarea de transporte de los LHD, algunas han estado en operación por algún tiempo, y otras recién han emergido.

AUTOMINE: SANDIK (Experiencia División El Teniente)

AutoMine es el nombre del sistema de Automatización del fabricante Finlandés de equipo minero Sandvik. El concepto AutoMine es un sistema productivo que incluye transporte y descarga automáticos, mientras que la carga de mineral es tele-operada. Este sistema se puede implementar tanto en camiones como a equipos cargadores LHD, y una de las principales ventajas que ofrece a los operadores es que pueden realizar la operación desde una sala de control y simultáneamente monitorear la flota de cargadores LHD o camiones que trabajan a kilómetros de distancia sin la necesidad de un operador a bordo.

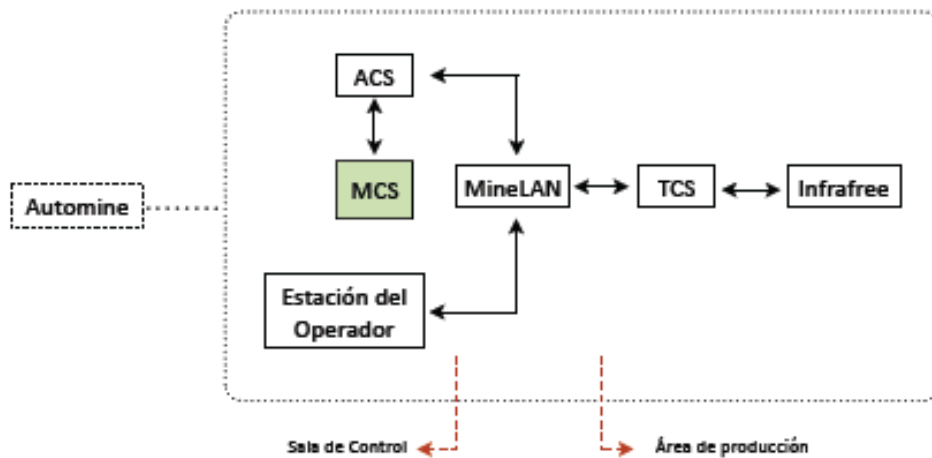
En particular, la aplicación implementada en Codelco El Teniente consiste en la automatización del proceso de extracción de mineral con LHD en Panel Caving. En rigor es una "semi-automatización" ya que la carga del balde de los LHD se realiza mediante tele-operación, el operador está ubicado 15 Km. fuera de la Mina, en Colón Alto. Las actividades de transporte, descarga y regreso al punto de extracción de mineral se realizan en forma automática. La sala de control del sector productivo Pipa Norte de División El Teniente, uno de los primeros sectores en que se implementó el sistema AutoMine en el mundo.

El sistema AutoMine basa las funciones de navegación y localización en navegación absoluta, sin embargo el sistema no es dependiente de infraestructura adicional instalada en la mina. Es por esta razón que el sistema debe, antes de entrar en operación, pasar por una fase de enseñanza durante la cual el vehículo es conducido manualmente en el túnel, permitiendo que los escaners registren el perfil de las paredes de este, para que así (como requiere la navegación absoluta) Auto Mine obtenga un bosquejo del entorno para lograr auto-orientarse en la mina.

Automine está compuesto por 3 subsistemas cuya función particular es:

- Sistema de Control de Misión (MCS): Suministra supervisión y control de operación, planificación de producción y control de funcionalidad, asigna las misiones de carga de los equipos LHD.
- Sistema de Control de Acceso (ACS): Controla el acceso del personal y equipos móviles al Área de Operación Autónoma de los cargadores. Su principal función es mantener aislado los LHD de personal y equipos de apoyo. Se compone de puertas, sensores y gabinetes en terreno, además de un software de control que evita la convivencia de LHD semiautomáticos con personas o equipos dentro de una misma área.
- Sistema de Control LHD (TCS): Sistema que monitorea los signos vitales del cargador, detectando fallas en los sistemas hidráulicos, eléctricos y electrónicos del cargador semiautomático.

Figura 4-5 Diagrama de arquitectura AutoMine



Estos 3 subsistemas mantienen una comunicación bidireccional permanente con los LHD semiautomáticos, sensores, puertas y gabinetes ubicados en terreno a través de un sistema de comunicaciones inalámbrico denominado Minelan (Mine Local Area Netwok) cuyo hardware está montado sobre los cargadores, en gabinetes en interior mina y en la sala de control en Colón Alto.

Los cargadores semiautomáticos están equipados con sensores y cámaras que permiten el telecontrol, la navegación automática y la descarga automática.

Figura 4-6 Sistema Automine y subsistemas – Detalle de funcionamiento

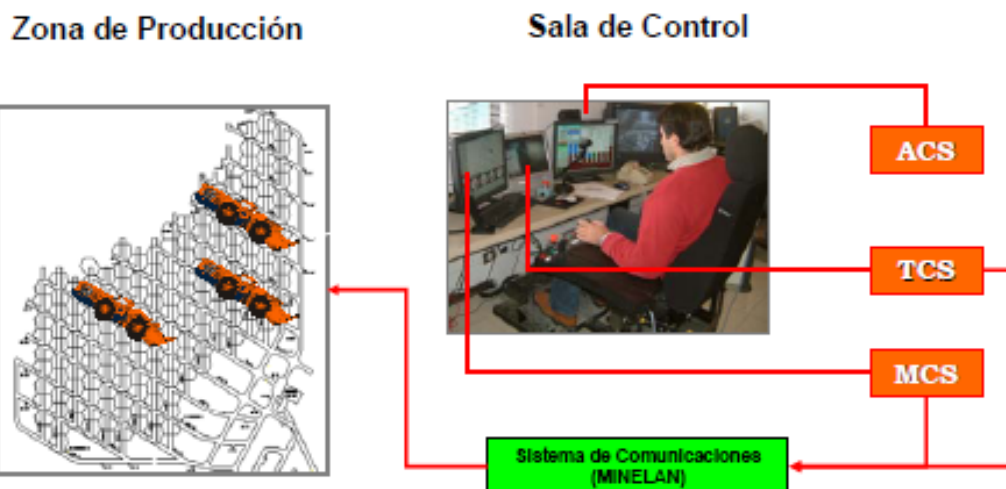


Figura 1: Sistema Automine™ y sus subsistemas - esquema representativo de su configuración

<p>LHD SEMIAUTOMÁTICO</p>	<p>LOCALIZACIÓN DE MODULOS Y CABLEADO</p> <ul style="list-style-type: none"> ● MODULAR ● CABLEADO ELECTRICO SIMPLIFICADO ● DIAGNOSTICO Y MONITOREO INTERNO ● PROTOCOLO CAN OPEN: ESTANDAR INDUSTRIAL PARA AUTOMATIZACION DE MAQUINAS
<p>CARGUIO DE MINERAL - TELEOPERACIÓN</p>	<p>NAVEGACIÓN AUTÓNOMA</p> <p>Scanner Láser</p>

5. MODELO OPERACIONAL DE MINERÍA SUBTERRÁNEA SEMIAUTÓNOMA

El “Modelo Operacional de Minería Semiautónoma” se construye a partir del diagnóstico y evaluación de las aplicaciones con LHD Semiautónomos (3 LHD SA Sandvik en Pipa Norte, El Teniente, 2004-2013) y las pruebas piloto de 1 LHD SA de los proveedores Caterpillar y Atlas Copco (III Panel, Andina, 2011-2012).

Este modelo conceptualiza y optimiza el proceso de extracción de minerales con equipos LHD Semi-Autónomos.

De los análisis y evaluaciones de las experiencias indicadas se concluye que la tecnología ha demostrado ser factible de aplicar, sin embargo, se han detectado brechas en el desempeño y funcionalidades respecto de los requerimientos de los proyectos estructurales, por lo cual se requiere incorporar nuevos desarrollos tecnológicos a través de un programa de innovaciones incrementales de la tecnología de automatización de LHD, bajo un Modelo de Negocio ad-hoc y efectuar un cambio significativo de las estrategias y tácticas operacionales, de mantenimiento, planificación, control centralizado, diseños mineros, entre las más relevantes, para así optimizar y capturar el mayor valor del uso de los LHD SA y Camiones Autónomos, para tener una mina eficiente e integrada en sus procesos productivos, con el mínimo de personal en interior mina, de manera de reducir los riesgos de seguridad y salud ocupacional, aumentando la productividad, con una mayor utilización del área activa y una menor variabilidad de la operación de extracción.

Se debe entonces, construir e implementar un Modelo de Minería SA, que permita sacar el mejor provecho de la tecnología haciéndose cargo de todos los aspectos que la componen, que cambian de manera relevante en relación con el modelo de uso actual. Las partes constituyentes de este Modelo son: el diseño minero, la estrategia operacional, la tecnología, los aspectos de seguridad y salud ocupacional, un nuevo modelo de desarrollo tecnológico (modelo de negocios con los proveedores), desarrollo de recursos humanos y de gestión del cambio y la mantenibilidad.

Figura 5-1 Diagrama de Desarrollo del Modelo de Minería Subterránea Semiautónoma

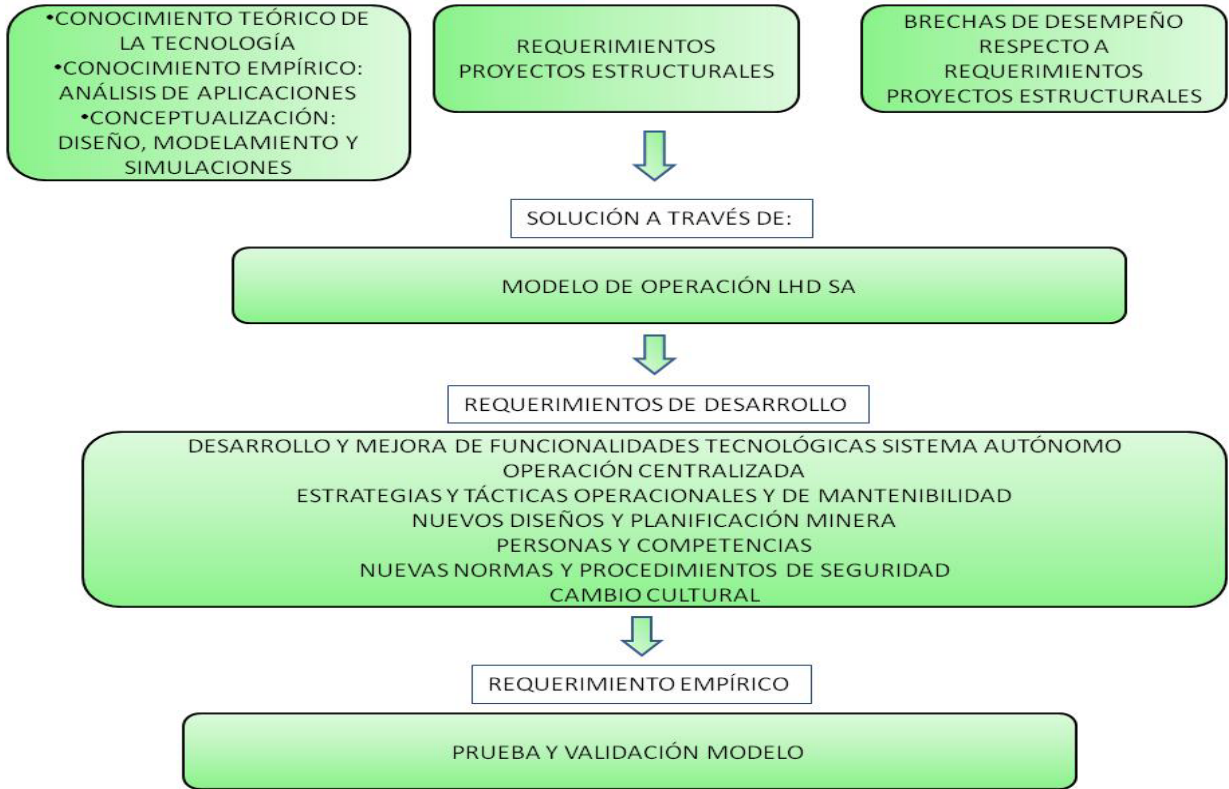


Figura 5-2 Componentes Centrales del Modelo de Minería Subterránea Semiautónoma



Los impactos esperados del Modelo Operacional de Minería en Equipos Semiautónomos son:

a) Seguridad y Salud Ocupacional.

- Retirar a los operadores de LHD del interior Mina, evitando las enfermedades de silicosis, osteomusculares y accidentes con tiempo perdido.

b) Mejorar la Productividad de la Mina Automatizada.

- Mayor velocidad de extracción, implicando una potencial menor área activa, mejorar el ramp up y/o perfiles de producción.
- Aumento de capacidad de producción del área automatizada.
- Aumento de productividad de operadores.
- Potencial mejora de costos por disminución de equipos y/u operadores.

c) Disminución de la Variabilidad y Riesgos del Cumplimiento del Plan de Producción

- El Modelo Operacional propuesto para la Minería Semiautónoma permitiría lograr una menor variabilidad que la operación realizada con equipo manual. La menor variabilidad surge como resultado de poseer un Modelo Operacional que entrega una mayor continuidad operativa integrando de manera coherente las actividades de reducción secundaria y mantención de los sistemas, sumado a una tecnología de automatización robusta, de última generación que satisface las altas exigencias de los proyectos y por otro lado, el contar con un modelo que minimiza las desviaciones con respecto a las cartas de extracción planificadas.
- Un plan de producción minero sustentado en sistemas productivos que poseen menor variabilidad, permite apalancar mayor valor y menor riesgo en el programa de producción minero. En otras palabras una mina subterránea operada con palas manuales o con palas semi - autónomas, pero sin el Modelo poseen una posición en la curva riesgo/retorno ineficiente con respecto a la frontera eficiente de financiamiento de carteras de negocio alternativas para operación minera subterránea con tecnología semi-autónoma.

Estos impactos deben ser analizados en cada etapa, de acuerdo a la aplicación específica del modelo y las condiciones mineras en las que se implementa.

En el siguiente Figura, se muestra el **Mapa Estratégico** del Modelo Operacional de Minería Semiautónoma, que presenta en forma integrada y resumida, los impactos esperados, los ámbitos de innovaciones, modificaciones de procesos y tecnologías claves y el capital intangible habilitante para capturar el mayor valor de la tecnología de automatización.

Figura 5-3 Mapa Estratégico del Modelo Operacional Semiautónomo (2014-2015).

MAPA ESTRATÉGICO DE MODELO OPERACIONAL SEMIAUTÓNOMO 2014-2020



5.1. GENERACIÓN DE VALOR DEL MODELO OPERACIONAL DE MINERÍA SEMIAUTÓNOMA.

En resumen los ejes que producen la generación de un mayor valor del modelo operacional semiautónomos, son los siguientes:

1. Mayor Utilización del área activa.

Una mayor utilización del área implica una mayor velocidad de extracción operacional. Esto es factible en cuanto a que se produce en forma simultánea en más de un módulo por calle, lo que incrementa la utilización del área productiva de una calle, reproduciéndose esto en las demás calles de un bloque ó área productiva.

2. Simultaneidad operacional.

Filosofía operacional de módulos que permitan realizar cachorro y reducción secundaria en la misma calle. Adicionalmente, se efectúan otras actividades de soporte no productivas en un módulo y con producción en los módulos adyacentes de la calle.

3. Continuidad operacional.

Se aumenta la continuidad operacional, incorporando un sistema de gestión de turnos que aproveche las características de los LHD semiautónomos, con “operación manilla-manilla”, junto con una estrategia operacional que genere constantemente que los módulos ya sea están en producción o con una actividad de un procesos de soporte que son optimizados, junto con una estrategia de mantenimiento y confiabilidad que mantenga la disponibilidad de la operación semiautónoma en los módulos, para tener la mayor cantidad del tiempo productivo disponible.

4. Aumento de productividad.

El diseño y planificación ad-hoc del Modelo Operacional que permita de manera sistemática tener una mayor productividad del área abierta, junto con las nuevas funcionalidades de la automatización que generan mejores factores operacionales (disminución de tiempos de ciclos para aumentar los rendimientos, aumentos de la utilización y disponibilidad)

5. Variabilidad operacional.

Con menor variabilidad operacional es posible realizar lo que se planifica – generando una mayor Confiabilidad del Plan de Producción. Esto es factible, debido a que la tecnología en las actividades autónomas de transporte y descarga del ciclo de trabajo, ha demostrado tener una baja variabilidad (del orden de un 5 a 10%). Se requiere también que la tecnología tenga una alta confiabilidad, disponibilidad y continuidad operacional, que haga que el proceso de extracción en los módulos productivos tengan bajas interferencias y pérdidas operacionales.

A continuación se presenta la forma de la operación además de los requerimientos necesarios para la ejecución de un Modelo de Minería Semiautónoma. En una primera parte se describe la estrategia operacional con los fundamentos indispensables para operar este modelo y en una segunda parte la filosofía operacional con los cambios en los modos de las actividades del LHD. Finalmente se describen los puntos a ajustar para permitir que la validación sea preparada y ejecutada de la manera correcta.

6.1.1. Estrategia Operacional

Se describe una estrategia de operación que se considera adecuada para trabajar bajo una geometría de módulos semiautónomos en la operación de LHD's SA.

Un punto clave es mejorar la utilización del área activa, a través de lo siguiente:

- Minimizar la interferencia de reducción secundaria con la producción.
- Minimizar los tiempos perdidos por pique lleno o sin carta de tiraje.
- Baja continuidad de operación de los LHD's SA debido a detenciones a mitad de turno lo que índice en un bajo tiempo efectivo de operación.
- Eliminar el concepto de turno y por tanto las pérdidas de tiempo por la entrada y salida del turno.

Respecto a los recursos humanos, la estrategia de operación trata de hacerse cargo de regular adecuadamente la relación entre número de equipos y operadores, su jornada de trabajo y cansancio.

Bases de la estrategia operacional.

Las bases de la estrategia operacional planteada se sustentan en aumentar la utilización del área productiva y a través de esta vía mejorar la velocidad de extracción de los LHD's. Estas bases se respaldan en los siguientes conceptos:

a) Sistema continuo

La estrategia de operación de los módulos semiautónomos se basa en una optimización, desde la actual concepción de turnos, a una operación continua en donde se optimiza el uso del área productiva y no el uso de los equipos.

Los módulos semiautónomos siempre se deben encontrar en actividad, ya sea en producción, descuelgue de puntos de extracción o cachorreo, mantención de los sistemas de navegación o reparación de la infraestructura minera.

Cuando el módulo se encuentra disponible, debe encontrarse en operación, por tanto debe tener un LHD SA asignado para la operación. En los únicos casos en los cuales puede existir detención del LHD SA son:

- Pique lleno.
- Carga de petróleo.
- Otras operaciones de apoyo como muestreo y/o mediciones geomecánicas.

b) Operación centralizada.

Se considera que la operación de los LHD SA se realice en forma de "call center", lo que significa que el LHD SA al momento de la carga de mineral siempre debe tener

un operador asignado. Esta asignación se realiza de forma automática buscando el HMI que se encuentre sin tarea asignada o próximo a ser desocupado.

Por este motivo, la organización de los turnos de trabajo de los operarios de LHD debe asegurar que el HMI siempre se encuentre ocupado, permitiendo una operación continua del LHD SA, independiente de los turnos y de las pausas de trabajo del operador de LHD dentro del turno.

c) Gestión integrada

Debe existir una sala centralizada con niveles estratégico-táctico-control a distancia, con sistemas expertos para control y gestión de producción, mantenimiento (predictivo), logística y servicios de apoyo. Para ello se debe construir un sistema de gestión de producción integrado que tome en cuenta y organice las decisiones de corto plazo que más afectan la productividad de los equipos, en los ámbitos antes descritos.

d) Aspectos de seguridad

La estrategia de operación debe ser acorde al estándar de control de fatalidades de la corporación, por lo cual debe procurar que la simultaneidad de las operaciones de carga con LHD y reducción secundaria en módulos contiguos; para la cual necesariamente debe existir personal, se realice cumpliendo este estándar.

Para ello se plantea la utilización de una barrera física móvil entre los módulos, la cual se encontrará abierta durante el tiempo que solo exista operación de los LHD SA, y se cerrará y moverá hacia el módulo que entra e reducción secundaria, para permitir el carguío de mineral desde los puntos de extracción que se encuentren cercanos a la barrera.

6.1.2. Actividades principales del módulo SemiAutónomo.

La siguiente tabla muestra un resumen de las actividades principales asociados a la bases de la estrategia operacional.

Tabla 5-1 Actividades principales del módulo SA.

Actividad	Descripción
Producción	Es la actividad principal del módulo SA, por lo tanto se debe procurar que cuando un módulo este disponible exista también una pala SA disponible para operar.
Reducción Secundaria	El módulo pasará a reducción secundaria cuando se hayan colgado un 70%-100% de los puntos de extracción. Los módulos adyacentes deben ser evacuados para evitar daños en los equipos. Una vez hecha la tronadura y ventilación, los módulos SA vuelven a estar disponibles para la producción.
Mantenimiento Infraestructura	Existen dos tipos de mantención: la del sistema de comunicación del sistema SA y la de la infraestructura minera. La primera debe hacerse cada vez que se reanude la producción después de la reducción secundaria y la segunda se planifica de acuerdo a la disponibilidad de módulos definida, que debe ser en torno al 90%.
Interferencia Productivas	Las actividades que interfieren con la producción son: la carga de petróleo que debe hacerse entre 20-40% de la capacidad del estanque, la inversión del equipo que debe hacerse una vez por turno y cuando haya pique lleno. A su vez también existen las operaciones de apoyo: la limpieza de calles, mediciones geomecánicas y el muestreo que debe realizarse cada un cierto número de baldadas.

Para aumentar la utilización del área activa y minimizar las interferencias operacionales, se plantea que las actividades ajenas de la producción se agrupen y se realicen de manera consecutiva.

6.1.3 Filosofía Operacional

Adicionalmente se describen los cambios en la filosofía operacional.

Tabla 5-2 Resumen de cambios en la operación del LHD.

Proceso	Operación Actual	Etapa Validación
Descarga	Manual	Automático
Viaje vacío al punto de extracción	Manual	Automático
Posicionamiento para carga	Manual	Tele-operado
Carga	Manual	Tele-operado
Salida punto de extracción	Manual	Tele-operado
Viaje lleno a pique de vaciado	Manual	Automático
Inversión	Manual	Automático
Limpieza de Calle	Manual	Tele-operado
Retiro calle por falle técnica	Manual	Manual

El proceso comienza con la asignación de una pala a un punto de extracción de acuerdo a la carta de tiraje programada. En el punto de extracción se pasa a modo tele-operado para que la pala realice el posicionamiento, carguío y salida del punto. En los cambios de automático a tele-operado (o viceversa) existen tiempos de espera que deben ser minimizados o nulos. La forma de transición es de tipo “call center”, es decir, que al momento que una pala necesita pasar a tele-operado debe existir un operador listo para tomar el mando. Una vez cargada la pala se dirige al pique de su módulo de manera automática. Ya hecha la descarga en el punto de vaciado, se reinicia el ciclo de operación. Se estima un operador cada dos o tres palas SA. Se debe decidir qué ocurre cuando no existan piques disponibles y si es factible que una pala SA se cambie de módulo o calle. La siguiente figura resume el ciclo y el modo de operación correspondiente a las palas SA.

Figura 5-4 Filosofía operacional LHD SA.



5.2. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS Y PARAMETROS CLAVES

Un diagnóstico y evaluación de resultados de la aplicación y prueba con LHD Semiautónomos, se resumen en:

- Aplicación con 3 LHD SA de Sandvik (Pipa Norte, El Teniente, 2004-2013)
- Pruebas piloto de 1 LHD SA de 7 yd3 de Caterpillar.
- Prueba piloto de 1 LHD SA 10 yd3 de Atlas Copco. (III Panel, Andina, 2011-2012).

Tabla 5-3 Resultados de Aplicaciones y Pruebas Piloto de LHD SA

Proceso	SANDVIK	CATERPILLAR	ATLAS COPCO
División	EL TENIENTE (1)	ANDINA	ANDINA
Sector	Pipa Norte	III Panel Nivel 16- CP79	III Panel Nivel 16- CP71 y CP79
LHD	13 yd3	7 yd3	10 yd3
Flota	4	1	1
Tecnología	AUTOMINE	MINEGEM	AUTOMATION
Período Aplicación	Junio 2004 –En Operación Actual	Enero 2011 - marzo 2012	Enero 2012-Diciembre 2012

En División El Teniente se implementó el Sistema de Automatización de LHD Automine de Sandvik, en una operación con tres equipos LHD SA de 13 yd3 en Diabolo Regimiento (2005-2007), el que se descontinuó por problemas de bajos rendimientos y baja continuidad operacional, lo que comprometía el cumplimiento de los planes de producción.

Tabla 5-4 Resultados de Indicadores Claves

Division / Indicador / Proveedor	División El Teniente Sandvik 3 LHD SA Pipa Norte			División Andina					
	Meta	Real	Cump %	Caterpillar 1 LHD CP 79			Atlas Copco 1 LHD CP 71		
Rendimiento (ton/hora_ef)	237	183,4	77%	300	265	88%	480	352	73%
Horas Efectivas (hrs/turno)	5,5 / 8	3,5 / 8	63%	8,7/12	5,3/12	61%	8,7/12	4,7/12	54%
Disponibilidad Total Flota LHD SA %	80	79,2	99%	80	55	69%	80	54	68%
Producción/Turno	9.656	6.134	64%	2.250	1.434	64%	4.200	1.715	41%

- (1) Valores medios Enero-Marzo 2012. (Fuente. Informe IM2 Prueba Caterpillar, DAND).
- (2) Valores medios de 2007-2011. (Fuente Ingeniería Minas División El Teniente, ADM-PE-INF-08-2012 Rev.0)
- (3) Valores medios Julio-Diciembre 2012. (Fuente. Informe IM2 Prueba Atlas Copco, DAND).
- (4) No se han generado accidentes con Horas Hombre Perdidas en las Aplicaciones y Pruebas LHD SA.
- (5) En Pipa Norte, se complementa la producción con 1 o 2 LHD Manuales, en sectores que no están automatizados, de manera de cumplir el plan de producción, por qué es operado con un sistema mixto.

Es relevante destacar que estos parámetros claves no son comparables entre sí, debido a que los diseños mineros-layout, condiciones de operación, distancias de acarreo, tamaño de equipos LHD, entre otros son diferentes.

De estas experiencias, se concluye que la tecnología ha demostrado ser factible de aplicar, sin embargo, en ninguna de ellas se cumplieron las metas definidas en los proyectos y pruebas, tal como se indica en la tabla anterior. Las principales causas que generan estas brechas son:

- Menores Rendimientos (ton/hr) debido a mayores tiempos de ciclos, respecto a operación manual y a la esperada: Menor velocidad media del equipo, mayores tiempos de carguío y descarga. Para acortar estas brechas, se requieren mejoras en el sistema de navegación, asistencia al carguío, programación de descarga, junto con modificaciones en los estándares de diseño minero (ancho de galerías, puntos de vaciados y pistas de rodados).
- Tiempos Efectivos (Hr/tno) menores a los estipulados en los proyectos estructurales y esperados en las pruebas, debido a altas interferencias por carecer de una estrategia de operación y funcionalidades para lograr mayor eficiencia operacional.(Gestión y control centralizado, cambio de calle, asignación dinámica de cartas de tiraje, control de tráfico y flota, etc)
- Menores Disponibilidades. Debido a la falta de robustez y confiabilidad de los sistemas de automatización onboard, comunicaciones y sistemas de confinamiento.

Para solucionar estas brechas se plantea la necesidad de un Modelo Operacional Semiautónomo, que es mucho más que la introducción de equipos LHD Semi autónomos en las operaciones actuales, sino más bien, es un cambio mayor en la concepción de la minería subterránea, que plantea repensar/rediseñar todos los ámbitos del proceso de extracción, tales como:

Ámbitos Estructurales:

- 1) Diseños y planificación minera,
- 2) Estrategias, tácticas operacionales y de mantenimiento,
- 3) Gestión y control operacional centralizadas,
- 4) Desarrollo Tecnológico (Nuevas Funcionalidades para mejorar desempeños de los factores operacionales de flotas).

Ámbitos de Diseño de Mejores Prácticas y Estándares:

- 5) Seguridad & Sustentabilidad.
- 6) Recursos Humanos.
- 7) Gestión del Cambio para operación de alta productividad y baja variabilidad.
- 8) Modelo de Negocio para el desarrollo tecnológico de nuevos estándares requeridos.

Este modelo de operación se debe hacer cargo, también de responder a los requerimientos de los Proyectos Estructurales sobre nuevas funcionalidades para la automatización que dicen relación con mejorar la productividad, tales como: captura en línea del estado de los puntos de extracción y piques de vaciado, operación centralizada tipo call center, herramientas de gestión en línea, entre otras. Todo lo anterior requiere generar un cambio profundo en la forma de hacer la minería como en las operaciones actuales, por ello se requiere de un proceso de Gestión del Cambio que permita provocar y consolidar un cambio cultural profundo en la forma de hacer la minería de extracción en nuestras operaciones actuales y futuras, para asegurar y mejorar los proyectos estructurales en forma sustentable y competitiva.

6. ANALISIS DE FORTALEZAS, DEBILIDADES DE LA TECNOLOGIA EN EQUIPOS LHD SEMI-AUTONOMOS.

Identificar las fortalezas, debilidades y proyecciones de las tecnologías implementadas y las disponibles de éstas, para así proponer mejoras y desarrollar un estándar para la automatización de LHD requiere de una adecuada evaluación de las tecnologías que han sido, en mayor o menor grado, implementadas. Es necesario considerar una adecuada caracterización del estado del arte y de las tecnologías disponibles en cuanto a implementaciones de sistemas de automatización de equipos en minería a gran escala, con el fin de asegurar un óptimo aprovechamiento de los beneficios que este tipo de desarrollos conlleva.

Los sistemas de LHD SA implementados en CODELCO han exhibido un resultado poco satisfactorio. Entre los principales problemas detectados por el personal en la operación de estos equipos se encuentra que el tiempo útil del operador en la pala es reducido, los tiempos de los ciclos autónomos son más elevados que los manuales, velocidad promedio de LHD SA menor que la de LHD manuales, proceso de descarga de LHD SA más lento que manual, espera de atención de los LHD SA, no es posible cambios de calle en forma autónoma. No es posible operar dos equipos en una sola calle, mal diseño de puntos de extracción que impide la entrada fluida de equipos, no existe asistencia de software en la etapa de carguío (manual), no existe realimentación de esfuerzos ejercidos por LHD, no hay visibilidad de la carpeta, menor tolerancia de la operación frente a la descalibración de los sensores, costoso y largo entrenamiento de operadores, descalibración de pesómetros en la pala, incompatibilidad de sistemas autónomos y personas.

El objetivo es lograr un análisis de la situación actual en la automatización de vehículos a nivel de Codelco-Chile(específicamente los equipos de las empresas Sandvik, Atlas Copco, Caterpillar), así como de las tecnologías y protocolos que están siendo utilizados y/o instalados actualmente a nivel mundial aplicables en los sistemas automáticos de LHD.

La información ha sido provista por diferentes empresas o instituciones, siendo las más relevantes Codelco-Chile, IM2, Sandvik, Atlas Copco y Caterpillar. Internet y material técnico disponible en el Centro AMTC (libros, revistas, informes técnicos, etc.) información que se ha utilizado para incorporar información y poder cuantificar el estado del arte en tecnología de automatización de maquinaria minera. Se generó un cuadro resumen con tópicos relevantes para este análisis, donde se categoriza la relevancia del tópico, así como la calidad y cantidad de la información provista por cada proveedor para cada uno de los distintos tópicos.

La escala utilizada para la relevancia de la información es:

- Alta: se trata de un tema esencial para la realización del análisis.
- Media: es un tópico importante cuyo aporte no es concluyente.
- Baja: no es un tema relevante para el análisis pero se tendrá en consideración.

La escala para categorizar la calidad y cantidad de información recopilada de las tres marcas a estudiar es la siguiente:

- Suficiente: se tiene suficiente información para obtener conclusiones.
- Baja: existe algo de información, pero no es suficiente.
- Insuficiente: es necesaria más información sobre este tópico.

Tabla 6.2-1. Categorización de tópicos, su relevancia y la cantidad y calidad de la información provista por los distintos proveedores. Ver texto principal para explicación de las distintas escalas utilizadas. (SA: Semi-Autónomo).

Tabla 6-1 Categorización de tópicos en Equipos Semiautónomos

Años	Relevancia	Sandvik	Atlas Copco	Caterpillar
Hoja de datos pala manual	Media	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Manual mantenimiento pala manual	Media	Suficiente	Suficiente	Baja
Manual operación pala manual	Media	Suficiente	Suficiente	Baja
Hoja de datos pala SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Manual de mantención pala SA	Baja	Suficiente	Baja	Baja
Manual operación pala SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Estudios de factibilidad técnico-económico	Baja	Suficiente	Baja	Baja
Entrevistas personal relacionado con operación de palas SA	Media	Baja	Insuficiente	Insuficiente
Eventos en operación de palas manuales	Media	Baja	Baja	Baja
Eventos en operación de palas SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Planos eléctricos sistemas palas SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Planos mecánicos palas manuales	Baja	Baja	Baja	Baja
Planos mecánicos sistemas SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Estudios de desempeño de palas SA vs Manuales	Media	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Descripción del sistema SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Logs del sistema SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Programa de Capacitación	Baja	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Problemas detectados con los sistemas SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Evolución de los sistemas SA	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Recopilación de datos referentes a velocidades, tiempos de ciclo, turnos, baldadas, etc.	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Resultados de pruebas	Alta	Suficiente	Suficiente	Suficiente

6.1. INDICADORES CLAVES DE DESEMPEÑO

Con el objetivo de comparar apropiadamente los sistemas de LHD SA de los distintos proveedores, es necesario definir indicadores de desempeño (KPI) comunes. Los criterios propuestos a continuación se pueden separar en tres categorías:

- a) Evaluación de la tecnología.
- b) Evaluación del desempeño.
- c) Evaluación de los servicios ofrecidos por la empresa.

EVALUACION DE LA TECNOLOGÍA.

Los indicadores englobados en esta categoría tienen por intención evaluar la calidad y pertinencia de la tecnología utilizada, considerando su desempeño, robustez, seguridad, estandarización y apertura (Ej. uso de estándar abierto).

Debido a la información disponible y a que el mayor criterio a utilizar en esta evaluación es el criterio experto, la mayor parte de los indicadores de evaluación de la tecnología son cualitativos. Estos indicadores se clasifican en seis diferentes categorías, de acuerdo con el tipo de tecnología que evalúan: **Sensores, Navegación, Actuación y control de LHD, Sistemas de seguridad, HMI (Human Machine Interface), y Comunicaciones.** Dichas categorías se describen a continuación.

Sensores.

El objetivo de estos indicadores es evaluar y posteriormente comparar el desempeño de los sensores utilizados para la navegación, construcción de mapas y detección de obstáculos.

- **Capacidad de detección.** Indicador que evalúa que tan bien el sensor detecta los objetos y/o landmarks¹ (para la navegación). Se expresa como la tasa de detección (cantidad de objetos reales detectados/cantidad de objetos reales). En caso de no estar disponible se reemplazará por un valor cualitativo mediante el criterio experto.
- **Capacidad de discriminación.** Indicador que evalúa que tan bien el sensor discrimina los objetos y/o landmarks útiles de los que no son útiles. Se expresa como la tasa de falsos positivos, o falsas detecciones, por unidad de tiempo. En caso de no estar disponible se reemplazará por un valor cualitativo mediante el criterio experto.
- **Rango de detección.** Corresponde a las distancias mínima y máxima en las que el sensor puede detectar un objeto o un landmark.
- **Robustez ambiental.** Es un indicador cualitativo, en base a criterio experto, de que tan robusto es el desempeño del sensor cuando se enfrenta con condiciones ambientales adversas como polvo, humedad, vibraciones, etc.
- **Ubicación en LHD.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, de que tan apropiada es la ubicación física del sensor en el LHD para la realización de la tarea encomendada.

Navegación.

Estos indicadores evaluarán los algoritmos de navegación y de construcción de mapas de entorno implementados en los sistemas de cada uno de los proveedores estudiados.

- **Desempeño de algoritmos de navegación.** A pesar de que existen indicadores cuantitativos para evaluar el desempeño de algoritmos de navegación, en el contexto de este análisis no se tendrá acceso a los datos suficientes como para obtener estos indicadores. Por lo tanto, se utilizará un indicador cualitativo, en base a criterio experto, de cuál es el desempeño de los algoritmos de navegación utilizados.
- **Pertinencia de algoritmos de navegación.** Este indicador mide si los algoritmos de navegación utilizados son adecuados o si existen mejores algoritmos disponibles. Este indicador será cualitativo, en base a criterio experto.
- **Robustez de algoritmos de navegación.** Al igual que en el punto anterior, se utilizará un indicador cualitativo, en base a criterio experto, de cuál es la robustez de los algoritmos de navegación utilizados frente a condiciones ambientales presentes en minas subterráneas.
- **Procedimiento de construcción de mapas de entorno.** Se analizará los procedimientos de construcción de mapas de entornos, los cuales son requeridos para la correcta navegación de los LHD en los sectores de la mina donde estos operan. Se evaluará la flexibilidad, pertinencia (existen mejores procedimientos disponibles) tiempo requerido de estos procedimientos. Este indicador será cualitativo, en base a criterio experto.

Sistema de Control en el equipo LHD.

Estos indicadores evalúan el sistema de control y su conexión con el LHD.

- **Conexión con LHD.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, que evalúa la forma en que el sistema de control se conecta con la máquina (LHD). Indica que tan invasivo es con la máquina, que tan estándar y que tan robusto es.
- **Estabilidad y robustez del sistema de control.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, que evalúa la estabilidad y robustez del sistema de control frente a perturbaciones ambientales y perturbaciones generadas por la interacción de la máquina con su entorno.
- **Tiempo de reacción.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, que evalúa el tiempo de reacción del sistema de control.

Sistemas de seguridad.

El objetivo de estos indicadores es evaluar los sistemas de seguridad y confinamiento del sistema.

- **Seguridad.** Indicador cualitativo que evalúa la seguridad del sistema, la capacidad del sistema de detectar y reaccionar ante situaciones riesgosas, y la capacidad del sistema de reaccionar ante imprevistos.
- **Interferencias operacionales.** Indicador que evalúa las interferencias generadas en la operación, debido a falsos positivos (falsas detecciones) del sistema de seguridad. Este indicador se calcula como la razón entre el tiempo de detención operacional (a causa de falsos positivos del sistema de seguridad) y el tiempo de análisis.

HMI.

Estos indicadores evalúan la interfaz hombre/máquina del sistema. Corresponden a la evaluación de la forma en que el sistema le entrega información al operador y la forma en que éste le da órdenes al sistema Semi-Autónomo.

- **Funcionalidad.** Indicador cualitativo de la funcionalidad que tiene la interfaz. Evalúa el nivel de inmersión generado en el operador, la capacidad de reacción que presenta el sistema, la facilidad y naturalidad del uso, la asistencia que presenta el sistema ante las ordenes del operador, y la calidad y relevancia de la información que se le entrega al operador.
- **Ergonomía.** Indicador cualitativo para evaluar si la interfaz considera en sus interacciones las características fisiológicas, anatómicas y psicológicas del operador.

Comunicaciones.

A través de estos indicadores se evaluarán las comunicaciones entre los LHD y la infraestructura de comunicaciones de la mina.

- **Cobertura.** Distancia máxima en la cual se asegura conexión. Se considerarán dos indicadores, uno nominal del sistema utilizado, y otro práctico de la aplicación a los túneles de la mina subterránea. Se considerará además la factibilidad de no tener zonas no-iluminadas.
- **Robustez.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, que evalúa la capacidad del sistema de comunicaciones para funcionar en condiciones ambientales adversas como las presentes en una mina subterránea.
- **Pertinencia.** Indicador cualitativo, en base a criterio experto, que evalúa la pertinencia de los protocolos y sistemas de comunicación utilizados (por ejemplo, frecuencias y canales wifi utilizados). En particular se analizará su compatibilidad con el estándar de comunicaciones definido por Codelco o la posibilidad de adecuarse a éste.

EVALUACION DEL DESEMPEÑO.

Los indicadores de desempeño considerados son cuantitativos y evalúan el desempeño que presentan los sistemas de LHD SA. Según corresponda, se considerarán el promedio, el máximo, el mínimo, y la desviación de cada indicador.

- **Disponibilidad de calles (%).** Razón entre el tiempo en que una calle está disponible para operar y el tiempo analizado.
- **Tiempo de ciclo en función de la distancia.** Tiempo utilizado en completar un ciclo (transporte vacío, carga, transporte cargado, descarga). Este indicador es función de la distancia.
- **Velocidad de transporte autónomo vacío.** Velocidad de desplazamiento del LHD en modo autónomo cuando no lleva carga.
- **Velocidad de transporte autónomo con carga.** Velocidad de desplazamiento del LHD en modo autónomo cuando sí lleva carga.
- **Velocidad en tele-operación.** Velocidad de desplazamiento del LHD cuando es tele-operado sin carga.
- **Tiempo de carga.** Tiempo en que se realiza la carga.
- **Tiempo de descarga.** Tiempo en que se realiza la descarga.
- **Disponibilidad Mecánica (%).** Porcentaje del tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para operar.
- **Utilización efectiva (%).** Porcentaje del tiempo en que el equipo opera efectivamente.
- **Tiempo efectivo (hrs/turno).** Tiempo en que el equipo opera efectivamente en un turno.
- **Rendimiento efectivo (ton/hrs. efec).** Razón entre el material extraído y el tiempo efectivo (ambos medidos en la misma base de tiempo, Ej. un turno).
- **Productividad extracción (tpd/HI).** Razón entre el material extraído en un día y la cantidad de operadores.

EVALUACION DEL PROVEEDOR.

Se consideran tres indicadores cuyo propósito es evaluar las características del proveedor.

- **Simulador de entrenamiento.** Se evaluará la existencia de un simulador para el entrenamiento de los operadores. En el caso de no existir, se evaluará si es que el proveedor está trabajando en el desarrollo de uno. Se considerarán las características que se proveen (o proveerán) en el simulador.
- **Curva de aprendizaje.** Tiempo que transcurre desde la implementación del sistema hasta que la productividad de extracción alcanza el valor de régimen permanente. Este indicador muestra el período de aprendizaje necesario para la operación del sistema SA provisto por el proveedor.
- **Flexibilidad y/o Capacidad del Proveedor para realizar adaptaciones:** Se evaluará la capacidad que tiene el proveedor para realizar modificaciones a los distintos componentes de sus equipos SA de tal forma de adaptarse a nuevos requerimientos.

6.2. DIAGNOSTICO DE LA TECNOLOGIA EQUIPOS MINERIA SUBTERRANEA.

Con la documentación que se posee se pueden identificar debilidades y fortalezas de los algoritmos de navegación y mapeo, de la sensorización y de los componentes de software y hardware en general. A partir de esto, es posible generar las recomendaciones pertinentes de requerimientos básicos que toda empresa de automatización debería cumplir para desarrollar un proyecto de LHD SA de la envergadura que Codelco se propone.

La solución al problema de la automatización parece ser abordada de manera similar por las compañías proveedoras de equipos indicadas. Con la información recopilada de publicaciones científicas, es posible distinguir similitudes y diferencias en sus algoritmos, detallados en publicaciones científicas.

La sensorización básica del LHD es la misma para todos los fabricantes y la forma de procesar la información que estos adquieren parece no ser la más óptima en comparación con los algoritmos de control y fusión sensorial actuales. En general, los sistemas no parecen ser robustos a pequeños cambios en la morfología del túnel o pérdidas de sincronismo con la odometría lo que demuestra que el sistema basa su localización en algoritmos poco flexibles.

Se tiene información de los sistemas de seguridad de los tres fabricantes indicados inicialmente. Son similares y han evolucionado en el tiempo. Son sistemas que, correctamente instalados, aíslan eficazmente las zonas en las que son operados LHD autónomos. Sin embargo, esta aislación física para impedir la interacción hombre-máquina, hace necesario detener parte importante del sistema. No queda claro que esta confinación sea absolutamente necesaria en escenarios futuros, donde se apliquen algoritmos actuales de percepción del entorno.

Se conocen los puestos de operación de los LHD. El análisis preliminar muestra, que si bien la información desplegada en los monitores intenta emular la que se obtiene en la cabina, esta no es suficiente para una óptima operación. Cuando el operador se encuentra en el LHD utiliza mucha información proveniente de las sensaciones que experimenta, estas sensaciones le entregan información adicional del comportamiento que presenta el LHD. La retroalimentación de estas sensaciones en el puesto de comando, más allá del sonido del motor, parece no ser un tópico abordado por ninguna de las tres compañías. No todos los fabricantes tienen incorporado en su sistema la opción de estimar la masa de la baldada. Atlas Copco y Sandvik realizan esta estimación adicionando sensores ajenos a la máquina que obtienen lecturas de las presiones hidráulicas en los cilindros del boom y el balde en posiciones definidas de estos.

Las comunicaciones han sido abordadas de la misma forma por las tres compañías y obedecen a los estándares actuales implementados por Codelco. Con el conocimiento de los sistemas se puede también distinguir que partes del sistema podrían ser "multimarca".

Los tópicos que son relevantes para lograr un diagnóstico de la tecnología de equipos Semi-Autónomos son:

Sensores.

Todos los proveedores utilizan escáneres láser para obtener información del túnel y alimentar sus algoritmos de navegación. Los escáneres láser se ubican hoy en el estado del arte en lo que respecta a navegación y creación de mapas. Sin embargo pueden presentar problemas cuando se utilizan en ambientes con condiciones ambientales extremas, como son el exceso de polvo o nieve. En condiciones en que los escáneres lasers no operan adecuadamente se podrían utilizar radares, que a diferencia del láser, se ve poco afectado por las condiciones ambientales. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología para aplicaciones de navegación y mapeo aún no está disponible de manera comercial. Es por esto, que la tecnología idónea para la navegación y creación de mapas son en la actualidad los escáneres láser.

Si bien los escáneres láser son adecuados para realizar la navegación y creación de mapas, dada la manera en que se encuentran instalados en la mayoría de las máquinas no entregan información adicional, como por ejemplo para la detección de obstáculo.

Como consecuencia de los algoritmos utilizados en la automatización del LHD, Sandvik, Atlas Copco y Caterpillar, montan los escáneres láser de manera tal que el haz emitido por ellos es paralelo al suelo (entre 1,5 y 2 metros). Esto implica que aunque se incorpore un algoritmo de detección de obstáculos, sólo sería posible identificarlos si tienen una altura mayor a la que el escáner se encuentra instalado. El hecho de no contar con información de la calle posibilita que se generen eventos que son traducidos en retrasos en la operación del LHD SA, como pinchazos, golpes a la máquina y eventual disminución de velocidad de transporte.

Confinamiento y seguridad.

Las marcas evaluadas Sandvik, Atlas Copco y Caterpillar comparten la misma filosofía en lo que respecta al confinamiento y seguridad en la operación de un LHD SA. Para el confinamiento utilizan barreras físicas y virtuales, que permiten aislar adecuadamente las áreas de operación. También cuentan con sistemas independientes dedicados al monitoreo de las áreas de confinamiento (PLC).

En los modelos actuales no se ha incorporado la posibilidad de interacción entre los LHD SA y otras máquinas o personas. El impacto operacional que esto genera es elevado, pues cada vez que una persona o máquina no SA ingresa al área confinada es necesario detenerla operación de los LHD SA. Para minimizar estas interferencias, los proveedores han generando protocolos de ingresos a los sectores productivos.

Las estrategias son muy similares entre los distintos proveedores, motivo por el cual unificar el sistema no supondría mayor dificultad. Un sistema integrado multimarca para el control de las áreas de confinamiento, que incluya la interacción con personas o maquinaria no SA, flexibilizaría la operación.

Comunicaciones.

El “Estándar Comunicaciones Inalámbricas Sistemas Autónomos / Semiautónomos Mina Subterránea” ha probado ser la solución a los problemas de comunicaciones que los distintos proveedores han enfrentado en las pruebas pilotos realizadas por parte de Atlas Copco y Caterpillar y en las operaciones de Sandvik. El estándar asegura una alta disponibilidad del sistema cuando es correctamente implementado. Las comunicaciones utilizando protocolo ethernet, sean alámbricas o inalámbricas, son parte de una tecnología madura y confiable.

Navegación.

Algunos proveedores analizados utilizan una conducción reactiva, que no depende de la estimación de la posición del LHD, lo que lo hace menos sensible a errores en esta estimación. El hecho de que la conducción dependa de la estimación de la ubicación del LHD puede hacer que el LHD tenga limitaciones de velocidad (para poder estimar mejor su ubicación), lo que se traduce en un aumento del tiempo de ciclo y por lo tanto, disminuye el rendimiento.

Los sistemas de navegación que estiman la posición del LHD en base a características fácilmente reconocibles, únicas (no se confunden con otras) y de posición conocida (como marcadores RFID), tienen un mejor desempeño que aquellos que utilizan características con incerteza en su posición con problemas de ambigüedad (como características extraídas de los láseres). Sin embargo, en las minas subterráneas tener estas características únicas de posición conocida sólo se puede lograr incorporando infraestructura como tag RFID u otros.

Algunos proveedores analizados utilizan características extraídas de los láseres y uno utiliza marcadores RFID para estimar su ubicación. Los tres proveedores pueden obtener desempeños aceptables usando sus metodologías.

En resumen, los algoritmos de navegación son adecuados luego de sintonizar a cada operación. Pero en algunos casos, la poca robustez de los algoritmos (sensibles a la estimación de la ubicación) puede estar limitando la velocidad, aumentando el tiempo de ciclo, y disminuyendo el rendimiento.

Creación de mapas.

Sólo uno de los proveedores ha realizado mapas en condiciones normales de operación. El proceso incluye un procesamiento manual que debe ser realizado por especialistas fuera de Chile, haciéndolo un proceso muy largo. Los demás proveedores dicen necesitar sólo una conducción para realizar los mapas, sin intervención de personal experto. Sin embargo, en las pruebas que se han realizado en Codelco han estado presente los expertos de cada marca que en condiciones normales están en el extranjero, por lo que no se puede con firmar que efectivamente los mapas puedan ser realizados sólo con una conducción y sin la intervención de personal especialista del extranjero.

En general, esta lentitud para la creación de los mapas está asociada a los algoritmos de navegación utilizados. Los sistemas que necesitan una estimación de la ubicación del LHD exacta y que necesitan detectar características que son ambiguas y difíciles de detectar, necesitan también mapas muy exactos, los que requieren de un mayor esfuerzo para su generación.

Este gran tiempo necesario para la creación de los mapas genera un largo tiempo de puesta en marcha. Lo que finalmente redundaría en que se necesita mucho tiempo para expandir o adaptar las zonas en que se opera.

HMI.

Todos proveedores evaluados tienen interfaces que intentan replicar la cabina de mando de un LHD. Todos tienen joysticks para manejar en modo tele-operado el levante/volteo del balde y la dirección, algunos utilizan los joysticks para controlar la velocidad, mientras que otros tienen pedales.

La asistencia que le brindan los sistemas al tele-operador son bajas. Los monitores instalados en la sala de operaciones despliegan el video y la información proveniente del LHD. El video proveniente del LHD corresponde a vistas hacia adelante y atrás que cambian automáticamente de acuerdo a la dirección de desplazamiento o manualmente si el operador lo requiere. Utilizando los escáneres láser en la máquina, sólo 2 proveedores presentan una visión en 2D generada a partir de las lecturas de estos sensores. Caterpillar también despliega en el video, utilizando barras de colores, la cercanía a las paredes del túnel. Sistemas como este son los que le permiten al operador obtener mayor información de su entorno y disminuir por ejemplo golpes de la cabina cuando el LHD es tele-operado. Esta baja realimentación que tiene el operador disminuye las velocidades en modo tele-operado, con el consecuente aumento en los tiempos de ciclo y posible disminución de la disponibilidad del equipo debido a golpes.

Carguío.

En todos los casos analizados el carguío es realizado de forma tele-operada. La baja asistencia con que cuenta el tele-operador al realizar esta tarea, implican que sólo los operadores más experimentados logran realizarla eficazmente. No existen realimentación de fuerza o inclinación de la máquina que le permitan al operador manipular el balde adecuadamente y así lograr un llenado óptimo. Los impactos de estas falencias son largos tiempos de carguío, lo que se traduce en tiempos de ciclo mayores.

Descarga.

Las rutinas de descarga son, para todos los casos estudiados, rutinas pre-grabadas. Para algunos casos estas rutinas se encuentran parametrizadas, lo que permite modificar parámetros hasta que el resultado sea el esperado. Las rutinas se gatillan cuando alcanzan un punto predefinido de la ruta. Dependiendo de la implementación de la rutina, pueden llegar a ser muy lentas. Esto implica mayores tiempos de descarga y por lo tanto mayores tiempos de ciclo.

Reportabilidad.

El nivel de reportabilidad es insuficiente, en general, no se ofrece acceso a las bases de datos completas y los sistemas no se conectan con los otros sistemas.

Además, cada proveedor define el significado de sus indicadores, por ejemplo, cada proveedor define cuando comienza y cuando termina el tiempo de descarga. El hecho de que cada proveedor tenga definiciones diferentes de los indicadores hace que los valores reportados para cada proveedor no sean comparables, haciendo difícil comparar el desempeño de forma cuantitativa de cada proveedor. Así mismo, las condiciones de prueba a las que han sido sometidos los proveedores son distintas, haciendo aún más difícil la comparación entre los proveedores.

Tabla 6-2 Resumen del diagnóstico de la tecnología

Sistema	Diagnóstico	Impacto
Sensores	Adecuados para navegación. Insuficientes para detección de obstáculos y estado del camino.	Es la actividad principal del módulo SA, por lo tanto se debe procurar que cuando un módulo esté disponible exista también una pala SA disponible para operar.
Confinamiento y seguridad	Adecuado. Existen interferencias operacionales por no considerar la interacción entre máquinas, entre máquinas y personas.	Poca flexibilidad de operación. No permite operación multi-marca. Agrega interferencias operacionales.
Comunicaciones	Solucionado por estándar Codelco.	Alta disponibilidad del sistema al usar estándar Codelco.
Navegación	Adecuado luego de sintonizar a cada operación. Poca robustez de los algoritmos puede estar limitando la velocidad.	Limita la velocidad, aumenta el tiempo de ciclo, y disminuye el rendimiento.
Creación de Mapas	Requiere procedimiento manual, el que muchas veces es realizado por especialistas fuera de Chile.	Largo tiempo de puesta en marcha. Se necesita mucho tiempo para expandir o adaptar las zonas en que se opera.
HMI	Baja asistencia al tele-operador con los sensores. No siempre existe vista estratégica.	Limita la velocidad de tele-operación, aumenta el tiempo de ciclo y disminuye el rendimiento. Disminuye la disponibilidad por golpes de LHD durante la tele-operación.
Carguío	Carguío es tele-operado, en algunos casos no hay ninguna asistencia a la tele-operación.	El tiempo de carguío puede ser muy alto, aumentando el tiempo de ciclo y disminuyendo el rendimiento.
Descarga	Sistema usa rutinas pregrabadas. En algunos casos sistema tarda mucho.	El tiempo de descarga puede ser muy alto, aumentando el tiempo de ciclo y disminuyendo el rendimiento.
Reportabilidad	Bajo nivel de reportabilidad. No hay uniformidad en los reportes, cada proveedor define sus propios indicadores.	Difícil comparación entre distintas marcas y operaciones. No se puede determinar con exactitud los tiempos de las etapas de operación del LHD. Poca integración con sistemas de operación de mina.

6.3. DIAGNOSTICO DE PRINCIPALES PROVEEDORES EQUIPOS LHD MINERIA SUBTERRANEA

Con el objetivo de comparar apropiadamente los sistemas de LHD SA de los distintos proveedores se presenta una tabla comparativa que contiene los conceptos más importantes para los tres proveedores analizados.

Tabla 6-3 Tabla Comparación Sistemas SemiAutónomos en Equipos LHD

Sistema	Diagnóstico		
	Sandvik	Altas Copco	Caterpillar
Sensores	Láseres no adecuados para ambientes con polvo		
Confinamiento y seguridad	PLC dedicados al monitoreo de sistema de alarma. Barreras físicas y ópticas. Activación de alarma detiene al LHD.	PLC dedicados al monitoreo de sistema de alarma. Barreras ópticas. Activación de alarma detiene al LHD.	PLC dedicados al monitoreo de sistema de alarma. Barreras físicas y ópticas. Activación de alarma detiene al LHD.
Comunicaciones	802.11 n Sigue estándar de Codelco.	802.11 n Sigue estándar de Codelco.	802.11g
Navegación	Algoritmo de navegación muy sensible a calibración de odometría. Sistema muy bien sintonizado en aplicación actual. Sensibilidad del algoritmo podría limitar velocidad máxima.	Algoritmo de navegación sensible a calibración de odometría. Sensibilidad del algoritmo podría limitar velocidad máxima.	Algoritmo de navegación no necesita localización exacta, sin embargo, depende de detección precisa de características como cruces de túneles. Esto puede limitar velocidad en cruce de túneles.
Creación de Mapas	Se requiere tomar muchas veces datos en los túneles. Mapas deben ser procesados por especialistas. Proceso puede tardar varios días.	Según proveedor, basta con sólo un recorrido por las rutas, el entrenamiento lo puede realizar cualquier operador.	Según el proveedor, sólo se necesita la topografía de los túneles, el sistema luego aprende automáticamente los detalles de la ruta.
HMI	HMI imita LHD, se transmite solo un video, falta asistencia en tele-operación, presenta información estratégica.	HMI tipo video-juego, se transmiten cuatro videos simultáneos, asistencia con láseres en tele-operación.	HMI imita LHD sin pedales, se transmiten dos videos simultáneos, asistencia con láseres en tele-operación.
Carguío	Carguío es tele-operado. No existe asistencia adicional.	Carguío es tele-operado. El operador puede conocer su posición en el punto de extracción utilizando visión láser.	Carguío es tele-operado. El operador puede conocer su posición en el punto de extracción utilizando la visión láser y las alarmas de proximidad a las paredes para evitar colisiones.
Descarga	Rutina grabada que se ejecuta en etapas de acuerdo a la posición del túnel. Se conoce la posición del balde. Realiza estimación de la masa transportada.	Rutina grabada que se ejecuta en etapas de acuerdo a la posición en el túnel. Se estima la posición del balde. Realiza estimación de la masa transportada.	Rutina grabada que se ejecuta en etapas de acuerdo a la posición en el túnel. Se estima la posición del balde. Realiza estimación de la masa transportada
Reportabilidad	Sólo entregan información establecida en contrato original, cada cambio es extra.	Disponen de base de datos propia, accesible por Codelco, pero no conectada al sistema de Codelco.	
Otras Características	Sistema de control de flotas que elije las rutas en base a cartir. Sistema para controlar múltiples LHD ya probado.		Herramientas de diagnóstico en línea VimsGuardian y MinestarHealth. MinestarFleet es una herramienta que permite el control y seguimiento en línea de los equipos y la productividad del proceso de extracción.
Condiciones de evaluación de tecnología	Opera en DET hace 10 años	Piloto en DAND < 1 año de duración	Piloto en DAND < 1 año de duración

Recomendaciones y proyecciones

Es necesario poder comparar el desempeño de los proveedores en igualdad de condiciones, para lo cual es fundamental que los proveedores sean sometidos a las mismas pruebas, por lo que se recomienda estandarizar los protocolos de pruebas y exigir su cumplimiento a todos los proveedores.

Sensores.

Se recomienda detectar obstáculos y estado del camino. Esto no es posible con los sensores láser instalados de forma paralela al piso. Por lo que se recomienda agregar sensores en otra posición y/o ángulo. Pueden ser sensores láser o radares.

La implementación de estos sensores adicionales permitiría detectar bolones, ayudando a la decisión de limpiar la calle y se puede disminuir los pinchazos. Todo esto permitiría aumentar la disponibilidad y aumentar la velocidad al disminuir la incerteza sobre el estado de la calle.

Confinamiento y seguridad.

Se recomienda estandarizar los sistemas de confinamiento y seguridad, esto permitiría que los distintos proveedores compartan la infraestructura, permitiendo la compatibilidad multimarca. Además su externalización puede ayudar a que los sistemas de confinamiento mejoren, así lograr disminuir las interferencias y mejorar la interacción entre máquinas y entre hombres y máquinas.

Navegación.

Se recomienda el uso de algoritmos de navegación que sean robustos, en el sentido de no depender de una estimación exacta de la ubicación del LHD. Se recomienda el uso de una conducción reactiva. Asimismo, en caso de que las políticas de Codelco lo permitan, se recomienda el uso de marcadores tag en los sistemas de localización, los que complementarían la información que se obtiene de los escáneres láser.

Por su robustez, se recomienda el uso de marcadores RFID, cumpliendo con el estándar corporativo de RFID. Usar algoritmos de navegación más robustos y/o complementados con marcadores se puede mejorar la velocidad de transporte, pues no se necesita limitar la velocidad para que el estimador de la ubicación tenga más precisión. Esto permite disminuir tiempo de ciclo, y aumentar rendimiento.

Creación de mapas.

La utilización de algoritmos más robustos, menos sensible a la precisión de la estimación de la ubicación, permite que los mapas que se deben usar sean más simples y que puedan ser creados en menor tiempo. Se estima que los mapas necesarios para estos algoritmos pueden ser creados en horas, por lo que se recomienda que en el largo plazo se debe exigir a proveedores que tiempo de creación de mapa de una calle sea 1 turno.

Poder crear los mapas en este tiempo disminuye la puesta en marcha y el tiempo necesario para expandir o adaptar las zonas en que se opera.

HMI (Interfaz Hombre-Máquina)

Es importante destacar que tener una mejor Interfaz Hombre-Máquina (HMI) hace que se requiera menos entrenamiento, pues el sistema puede ser más intuitivo. Además, tener una mejor visualización de la realidad, hace al sistema más intensivo. En consecuencia, tener una mejor HMI puede significar bajar los requerimientos sobre un operador muy entrenado y con mucha experiencia.

Facilitar la tele operación permite que el operador pueda cargar en menos tiempo y de mejor forma, además permite que otras actividades ejecutadas de forma tele-remota (por ejemplo, limpieza de calles) se realicen en menor tiempo.

Por esto, se recomienda que se exija a los proveedores que se utilice asistencia con los sensores en la tele-operación. Esta asistencia puede ir desde simplemente desplegar la información adquirida con los sensores, hasta utilizar la información para que el LHD tome decisiones mientras es tele-operado, evadiendo obstáculos y paredes. Adicionalmente, se recomienda exigir la existencia de una vista estratégica en la HMI. Se estima que esta característica es fundamental cuando se está manejando una flota de LHD.

Con estas mejoras, se puede aumentar la velocidad de tele-operación, disminuyendo el tiempo de ciclo y aumentando el rendimiento. También se puede mejorar la disponibilidad por menos golpes del LHD.

Carguío.

Se recomienda mejorar la HMI y/o automatizar el carguío para los casos de granulometría homogénea. Mejorando la tele-operación (HMI) o automatizando el carguío se puede disminuir el tiempo de ciclo y aumentar el rendimiento

Descarga.

Se recomienda mantener las rutinas pregrabadas, pero aumentar fluidez de los movimientos, eliminando tiempos muertos y también exigir el uso de un pesó metro. Con esto se obtiene menor tiempo de descarga, disminuyendo el tiempo de ciclo y aumentando el rendimiento. También se mejora la reportabilidad del material transportado.

Reportabilidad.

Es fundamental estandarizar la información reportada, definiendo los indicadores y su procedimiento de medición para todos los proveedores por igual. Con esto se puede comparar de mejor forma los datos de los distintos proveedores.

La información reportada debería incluir al menos la siguiente información:

- Tiempo de descarga. / Tiempo de carga. / Tiempo de transporte.
- Velocidad de transporte vacío. / Velocidad de transporte con carga.
- Carga en el balde.
- Tiempo en operación tele-remota.
- Velocidad de transporte en operación tele-remota.
- Tiempo en operación autónoma./Tiempo en operación. / Tiempo en reserva. / Tiempo fuera de servicio.
- Log con fallas y eventos. / Log con eventos de seguridad y confinamiento.
- Tiempo de interferencias operacionales.
- Utilización efectiva.
- Disponibilidad.
- Tiempo de operación efectiva.

Tabla 6-4 Recomendaciones por Sistema de Operación Semiautónomo.

Sistemas	Recomendación	Impacto
Sensores	Agregar sensores en otra posición para detectar obstáculos y camino	Se puede detectar estado del camino (bolones), aumentando velocidades de transporte, ayudando a la decisión de limpiar calle. Se disminuyen pinchazos, aumenta la disponibilidad.
Confinamiento y seguridad	Externalizar para compatibilidad multi-marca. Se puede mejorar para disminuir las interferencias y mejorar la interacción entre máquinas, entre hombres y máquinas.	Se puede mejorar la flexibilidad con operación multi-marca y disminuir las interferencias.
Comunicaciones	Mantener y exigir estándar de Codelco.	Se mejora notablemente disponibilidad del sistema.
Navegación	Utilizar algoritmos robustos.	Se puede mejorar velocidad, disminuir tiempo de ciclo, y aumentar rendimiento
Creacion de Mapas	Exigir a proveedores que el tiempo de creación de mapa de una calle sea un turno. Se debe demostrar esta capacidad.	Se disminuye el tiempo de puesta en marcha y el tiempo necesario para expandir o adaptar las zonas en que se opera.
HMI	Exigir asistencia con los sensores en la tele-operación y vista estratégica. Utilizar simuladores para el entrenamiento de los operadores Implementar sistemas de realidad aumentada.	Se puede aumentar la velocidad de tele-operación, disminuyendo el tiempo de ciclo y aumentando el rendimiento. Se puede mejorar la disponibilidad por menos golpes del LHD. Se mejora el desempeño de los operadores y se puede realizar gran parte del entrenamiento sin utilizar LHD reales. Se reduce el tiempo de entrenamiento de los operadores.
Carguío	Mejorar HMI y/o Automatizar el carguío para los casos de granulometría homogénea.	Mejorando la tele-operación (HMI) o automatizando el carguío se puede disminuir el tiempo de ciclo y aumentar el rendimiento.
Descarga	Mantener rutina pregrabada, pero aumentar fluidez y exigir pesómetro.	Se obtiene menor tiempo de descarga, disminuyendo el tiempo de ciclo y aumentando el rendimiento. Mejor reportabilidad del material transportado.
Reportabilidad	Estandarización información reportada, definiendo los indicadores y su procedimiento de medición para todos los proveedores por igual.	Se puede comparar de mejor forma los datos de los distintos proveedores. Se tiene mps y mejor información para la operación.
Pruebas de proveedor	Estandarización de los protocolos de pruebas y exigir su cumplimiento a todos los proveedores.	Se puede comparar los desempeños de los proveedores en igualdad de condiciones.

Tabla 6-5 Recomendaciones por impacto

Impacto	Recomendaciones
Mayor velocidad de transporte	Agregar sensores para evaluar estado del camino. Utilizar algoritmos de navegación robustos a la estimación de la ubicación del LHD
Menor tiempo de ciclo	Agregar sensores para evaluar estado del camino. Utilizar algoritmos de navegación robustos a la estimación de la ubicación del LHD Exigir asistencia con los sensores en la tele-operación y vista estratégica. Automatizar el carguío para los casos de granulometría homogénea. Aumentar fluidez de descarga. Exigir cambios de estado autónomo/teleoperando sin detención.
Mayor disponibilidad	Agregar sensores para detectar obstáculos (bolones). Exigir asistencia con los sensores en la tele-operación y vista estratégica.
Mayor Utilización	Agregar sensores para detectar obstáculos (bolones). Exigir asistencia con los sensores en la tele-operación y vista estratégica.
Sistema Multi-Marca	Estandarizar y externalizar sistemas de confinamiento y seguridad. Externalizar comunicaciones.
Menor tiempo de puesta en marcha y expansiones	Exigir a proveedores que tiempo de creación de mapa de una calle sea un turno. Utilizar simuladores para el entrenamiento de los operadores. Implementar sistemas de realidad aumentada. Mejorar HMI para operadores.
Operación tipo call center	Exigir asistencia con los sensores en la teleoperación y vista estratégica. Implementar estándar de automatización para utilizar sistema de control de flota estándar. Exigir cambios de estado autónomo/teleoperando sin detención. Exigir peso metro
Reportabilidad	Estandarizar información reportada, definiendo los indicadores y su procedimiento de medición para todos los proveedores por igual. Estandarizar los protocolos de pruebas y exigir su cumplimiento a todos los proveedores.

Tabla 6-6 Recomendaciones por Proveedor.

Sistema	Sandvik	Atlas Copco	Caterpillar
Sensores	Agregar sensores en otra posición para detectar obstáculos y camino.		
Confinamiento y seguridad	Externalizar para compatibilidad multi-marca. Se puede mejorar para disminuir las interferencias y mejorar la interacción entre máquinas, entre hombre y maquinas.		
Comunicaciones	Mantener y exigir estándar Codelco.		
Navegación	Utilizar algoritmos robustos a la estimación de la ubicación.	Utilizar algoritmos robustos a la estimación de la ubicación.	Mejorar sintonización de algoritmos.
	En caso de que Codelco estime aceptable la utilización de tag RFID, agregar tag RFID a sus algoritmos.		
Creación de Mapas	Exigir a proveedores que tiempo de creación de mapa de una calle sea en un turno. Se debe demostrar esta capacidad.		
HMI	Mostrar información de láseres en HMI. Utilizar información de láseres para asistir la teleoperación.		
	Utilizar simuladores para el entrenamiento de los operadores. Implementar sistemas de realidad aumentada.		
Carguio	Automatizar el carguío para los casos de granulometría homogénea.		
Descarga	Mantener rutina pregrabada. Mantener pesó metro.	Mantener rutina pregrabada. Mantener peso metro.	Mantener rutina pregrabada. Mantener pesó metro. Mejorar detección de punto de descarga.
Reportabilidad	Estandarizar información reportada, definiendo los indicadores y su procedimiento de medición para todos los proveedores por igual.		
Pruebas de proveedor	Estandarizar los protocolos de pruebas y exigir su cumplimiento a todos los proveedores.		

7. COMPORTAMIENTO OPERACIÓN EQUIPOS SEMIAUTONOMOS SECTOR PIPA NORTE EN DIVISION EL TENIENTE – CODELCO CHILE.

La tecnología utilizada en Mina Pipa Norte, considera el acarreo de mineral en forma semi autónoma con palas LHD de 13 yd³, donde el operador se ubica a 15 km de la mina, en Colón Alto. El sistema se denomina Automine y fue desarrollado por la empresa Sandvik.

La ingeniería básica del proyecto consideró que para una capacidad productiva de 10.000 tpd se necesitarían 3 equipos LHD de 13 yd³, operados a distancia por un trabajador. Esta fue desarrollada de acuerdo a estudios de simulación que incluyeron consideraciones de los principales KPI; los cuales alcanzarían ciertas mejoras con respecto a la operación manual.

La realidad operacional después de haber operado 10 años, muestra ciertas desviaciones con respecto a lo prometido por el proyecto. El sector Pipa Norte se considera en régimen, para efectos de análisis, entre el año 2009 ala fecha.

En la mina Pipa Norte, las operaciones con AutoMine se iniciaron a comienzos del año 2004, y desde entonces se han generado cambios en beneficio del funcionamiento del sistema, los cambios más significativos fueron el cambio de red WUCS a Minelan, levantamiento de la Automine Box (encapsular todos los sistemas onboard en una parte específica de los equipos, en dónde va el aire acondicionado), mejoramiento en posición y alarmas, actualización software para permitir operaciones de LHD modelo LH517 con el sistema Automine.

Conceptos del Sistema Automine

AutoMine® es un sistema automatizado para operación de flotas de LHDs asociado a la marca Sandvik. El sistema permite a un operador manejar varios LHDs a distancia desde una sala de control. Los LHDs son semiautomáticos ya que el carguío es teleoperado. El transporte y vaciado es automático. El área autónoma es aislada por el sistema de control de acceso para asegurar operación segura y continua.

Visión general del sistema

Máquinas

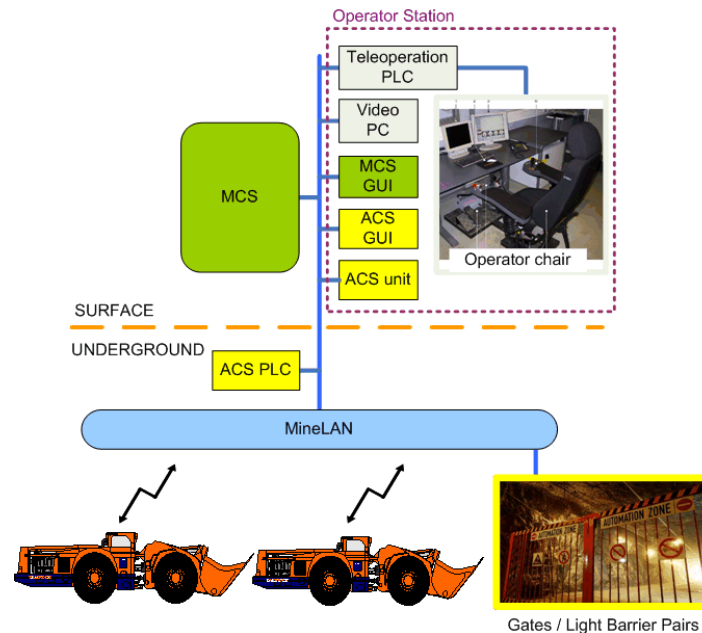
Como parte del sistema AutoMine® pueden haber varios modelos de máquinas Sandvik que van desde LHD eléctricos a camiones dumpers. El sistema puede ser configurado para controlar una o más maquinas en la misma o en múltiples áreas separadas de producción.

Arquitectura del Sistema

La arquitectura del sistema AutoMine® consiste en sub-sistemas separados. Estos sub-sistemas son:

- Sistema de Control de Misiones (MCS)
- Sistema de Control de Acceso (ACS)
- Sistema de Comunicación MineLAN,
- Sistema de Automatización a bordo e Interfaces Externas.

Figura 7-1 Arquitectura de AutoMine®



Sistema de Tele operación – Estación del Operador

El Sistema de Tele operación permite al operador usar la Estación de Operación para usar remotamente los equipos unidos al Sistema AutoMine®. El principal componente del Sistema de Tele operación es la silla del operador que es muy similar al asiento que tienen las cabinas de las máquinas.

Sistema de Control de Misiones

El sistema de control de misiones es responsable del manejo de misiones de las máquinas, supervisar reglas de tráfico, crear listas de misiones del plan de producción, crear reportes de producción, recolectar datos de condiciones de las máquinas y comunicarse con sistemas externos.

Sistema de Control de Acceso

Sistema de Control de Acceso es el responsable de la aislación del área automatizada y la seguridad general del sistema AutoMine®. La aislación se hace con múltiples puertas o un par de barrera de luces. Estas son capaces de detectar violaciones de seguridad dentro o fuera del área automatizada. Si una violación es detectada en el área automatizada y

existen máquinas trabajando en el lugar, esto obligará un estado seguro (detención automática del sistema). Hay también unidades de ACS a bordo de las máquinas y como parte de la Estación del Operador.

MineLAN

El Sistema de Comunicación MineLAN está basado en Ethernet permitiendo que los subsistemas se comuniquen entre sí vía protocolos de comunicación IP. La red MineLAN consiste en un estándar 100/1000 basado en IEE 802.3 redes Ethernet e IEE 802.11g basados en redes Ethernet inalámbricas. La capa física de la red es una combinación de par trenzado, fibra multi modo, fibra mono modo y redes inalámbricas.

Sistema de Automatización a Bordo

El Sistema de Automatización a Bordo es responsable de una máquina automatizada y funciones de tele-operación. El Sistema de Automatización a bordo consiste en un PC de navegación InfraFREE, unidad de ACS a bordo, video box, cámaras, escáneres, sensores CAN y Módulo Sensor (Gyro).

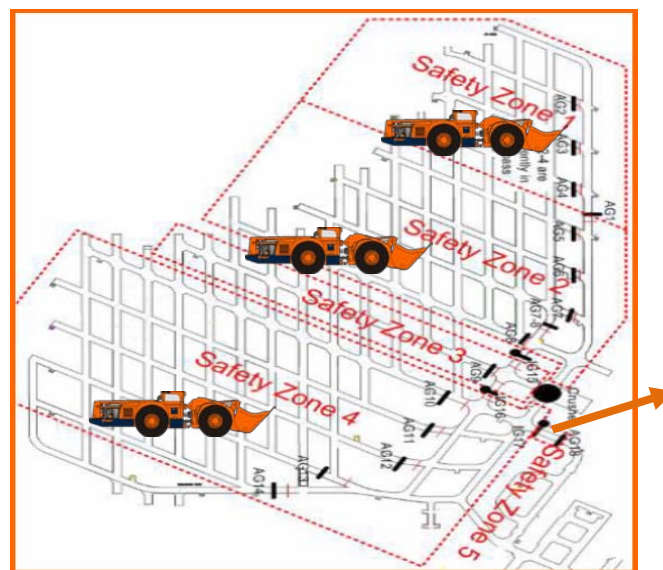
Interfaces Externas

El Sistema de Control de Misiones puede comunicarse con sistemas externos vía OPC y basados en interfaces SQL.

Zonas

El sistema está concebido por zonas, las cuales son independientes entre sí, a través de esta forma se pueden realizar el proceso de extracción; además el sistema cuenta con un sector llamado "transit" en el cual los equipos pasan de un estado manual a semi autónomo y viceversa.

Figura 7-2 Esquema del área de Operación del Equipo



Ventajas del Sistema AutoMine.

Tabla 7-1 Ventajas del Sistema AutoMine.

Concepto	LHD SEMIAUTOMÁTICO	LHD MANUAL
Mano de Obra	1 operador cada 3 a 5 equipos ubicado en sala de control más un operador para ingresar los equipos a las Zonas de Automine en interior mina	1 operador por equipo, ubicados en LHD
Sala de Control	Una consola para 3 equipos	No requiere sala de control
Control Visual	Requerido sólo en la operación de carguío, con cámaras especiales	Desde cabina, normal
Condiciones de visibilidad	Sólo se requiere buena visibilidad en el punto de carguío de mineral	Normales
Ambiente de trabajo	Ideal, libre de la exposición a la humedad, humos, gases, polvo, ruido	Normal, exposición a la humedad, humos, gases, polvo, ruido
Seguridad del operador	Condición de máxima seguridad, sin exposiciones a colisiones, estallidos de roca, incendios.	Condición normal de seguridad, exposiciones a colisiones, estallidos de roca, incendios
Enfermedades profesionales	Bajo riesgo de enfermedades profesionales asociadas a la operación de equipos y a trabajos en interior mina	Riesgo de enfermedades profesionales asociadas a la operación de equipos y a trabajos en interior mina
Personal en terreno	Menor presencia personal en terreno	Presencia normal de personal en terreno
Innovación Tecnológica	Representa un gran avance tecnológico en Chile	Representa un sistema típico.
Operación	Automático en descarga y transporte. Manual Tele comandado en carga	Manual completo
Seguridad operador	Máxima	Normal, típico sistema actual tradicional
Tiempo de llegada a postura	Óptima, 15 km menos de viaje, no necesita EPP en Colón Alto	Normal
Ergonomía	Condiciones óptimas	Condiciones normales o típicas del sistema actual

Desventajas del Sistema Automine.

Tabla 7-2 Desventajas del Sistema Automine.

Concepto	LHD SEMIAUTOMÁTICO	LHD MANUAL
Control de velocidades y aceleraciones	Velocidad Restringida, por seguridad y condición de sistema (máximo 10-12 km/hr)	Regulados por el operador, de acuerdo a visibilidad y decisiones instantáneas.
Sensación del operador sobre la máquina	No hay relación entre operador y equipo	Relación directa entre operador y máquina (operador siente el equipo)
Disponibilidad Mecánica	Bajo 80% , inicialmente por desconocimiento del sistema, luego por envejecimiento de la flota	Disponibilidad típica de los equipos
Pérdidas operacionales	Alta dado que para cada intervención de agentes exógenos al sistema, este debe bajarse completamente generando una detención total de la zona en cuestión	Regular, dado que las interferencias son básicamente en la calle/zanja dónde ocurre la interferencia
Capacidad de balde	Menor aprovechamiento, el operador al no tener sensibilidad con el equipo, no se puede considerar una capacidad de llenado óptimo del balde	Óptimo, dado que el operador tiene la sensación del balde puede llenar aún más y la capacidad por baldada es mayor
Distancias	Más afectada, dado que la velocidad es constante el sistema no permite mayor velocidad en tramos largos, actualmente es solo de 10-12 km/hr	Variable, si el operador ve mayor distancia es capaz de aumentar velocidad.
Rendimiento	176 (aprox.) Ton/Hr Efectiva	210 (aprox.) ton/HrEfect.
Interferencias	Altas, debido a que el manejo de materiales de tres puntos vacían al mismo martillo, genera interferencia, además de la detención total de una zona por condiciones de seguridad al generarse una interferencia	Típica sistema normal

7.1. INDICADORES OPERACIONALES REALES VERSUS COMPROMETIDOS POR PROYECTO.

A continuación se muestran los indicadores comprometidos por el proyecto original:

Tabla 7-3 Indicadores Base Proyecto Operación SemiAutónoma.

Indicadores	
Disponibilidad Mecánica	80%
Utilización	86%
Tiempo Efectivo	5,5 hrs Efectivas/turno
Rendimiento	237 ton/hr. Efectiva
Productividad Extracción	2.500 tpd/HI (1 operador con 3 LHD)
Costo Operación Extracción	0,34 US\$/ton (M.O,M&R, Combustible, Suministros y Servicios)

Disponibilidad Mecánica

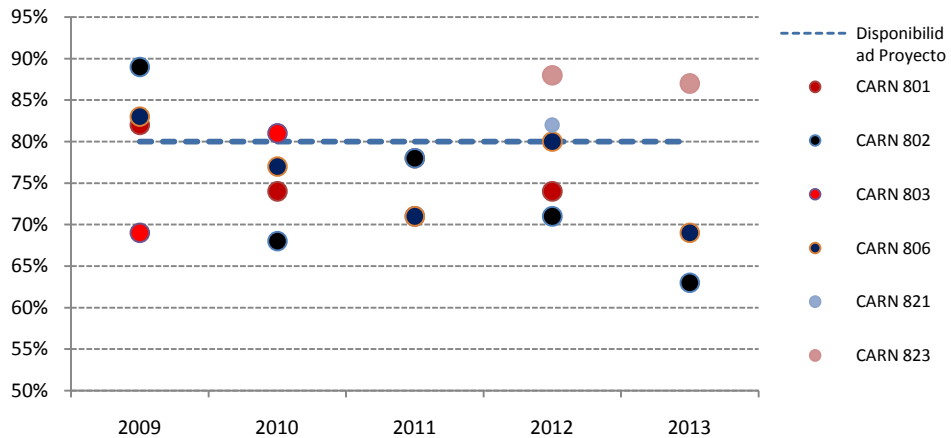
A la fecha, la Disponibilidad Mecánica, alcanza el 80% de acuerdo a lo comprometido entre los años 2009 a 2013, con algunos valores inferiores a la meta debida exclusivamente al envejecimiento del parque de equipos, lo que obligó a realizar reparaciones mayores, mejorándolo con la incorporación de nuevos equipos durante el año 2012. Los valores de la disponibilidad mecánica incluyen la disponibilidad del equipo y del sistema onboard.

La disponibilidad entre los años 2009 al 2013 ha sufrido cambios. En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los hitos más relevantes con respecto a este parámetro:

Tabla 7-4 Comportamiento Equipos en Operación SemiAutónoma

Años	Disp. Mecánica	Observaciones
2009	81%	Sobre el proyecto, por mejoras al sistema y conocimiento de la tecnología.
2010	76%	Envejecimiento del parque, se inician reparaciones mayores a equipos 801-802-803.
2011	74%	Equipos en pleno mantenimiento mayor, con esto se prolonga vida económica en 10.000 hrs.
2012	79%	Termino mantenimiento mayor e incorporación de nuevos equipos al parque.
2013	79%	Se mantiene la disponibilidad, menor uso de equipos que año anterior.

Figura7-3 Disponibilidad por Equipo



Tiempo Efectivo y Utilización Efectiva

Tiempo Efectivo

Actualmente el tiempo efectivo de operación de la pala LHD de producción es del orden de 3,2 horas efectivas flota, que está dentro de la curva normal del resto de la mina (de un rango de 3,1 a 3,5 horas efectivas por equipo).

El proyecto prometió 5,5 horas efectivas por turno, bajo el concepto que el operador estaría en Colón Alto y no en interior mina, lo que generaría un mejor aprovechamiento de los tiempos. Sin embargo, el proyecto no consideró las interferencias (por ejemplo, revisión del equipo en terreno, reducción secundaria, petróleo, etc.) y la intervención de equipos manuales en zonas con sistema Automine, lo que afecta seriamente el tiempo efectivo, aproximadamente en un 20% del tiempo total. En la figura siguiente se muestra el desglose de los tiempos en un turno de 8 horas, datos reales entre el año 2009 a julio 2013, según norma ASARCO.

Figura 7-4 Desventajas del Sistema Automine.

TIEMPO NOMINAL Ej: 8 Horas			
TIEMPO DISPONIBLE 6,24 Hrs.		MANTENCIÓN 1,76 Hrs	
TIEMPO OPERATIVO 4,8 Hrs		RESERVAS 1,44 Hrs	NO PLANIFICADA 1,36 Hrs
TIEMPO EFECTIVO 3,2 Hrs	INTERFERENCIAS 1,6 Hrs		PLANIFICADA 0,4 Hrs
	PROGRAMADAS 0,464 Hrs	NO PROGRAMADAS 1,136 Hrs	

Utilización Efectiva

Es el parámetro porcentual de las horas efectivas, con la diferencia que el porcentaje de utilización efectiva está bajo la disponibilidad.

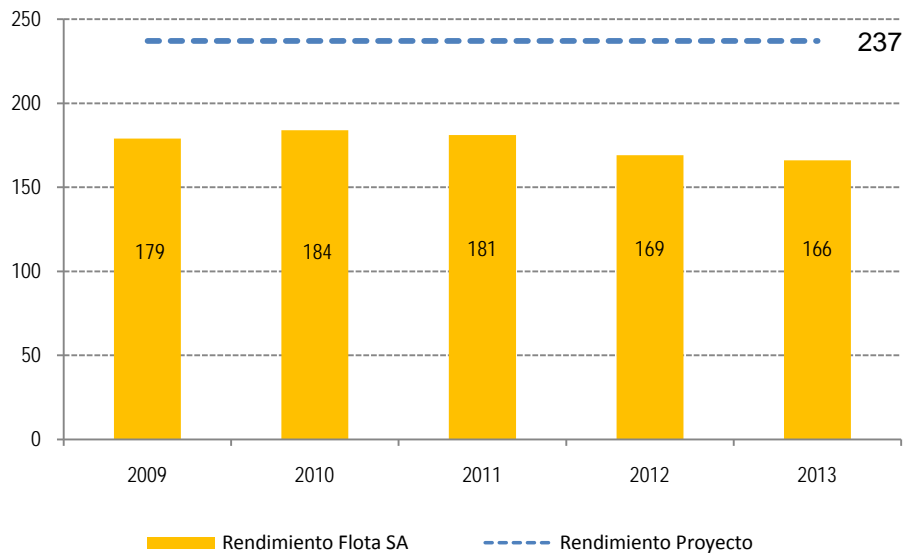
El compromiso del proyecto fue de 86% versus 51% entre los años 2009 al 2013, siendo las causas las mismas expuestas en el caso del tiempo efectivo: altas interferencias e intervención de equipos manuales en sectores con Automine.

Rendimiento

El rendimiento planificado por el proyecto original para los equipos de Pipa Norte bajo el sistema Automine era de 237 (Toneladas / Horas Efectivas), tomando en consideración que un sistema manual de LHD 13 yd³ logra un rendimiento promedio de 210 (Ton/hr efectivas); además la velocidad programada de los equipos SA, se consideró 20 (Km/hr) v/s 14 (Km/hr) promedio real en el sistema SA, a diferencia de los equipos manuales que la velocidad es regulada por el operador, que podría alcanzar hasta 25 (Km/hr).

El rendimiento efectivo de los equipos LHD SA es de 176 (ton/ Hora efect.) entre los años 2009 al 2013, sin embargo, este indicador ha disminuido a consecuencia del aumento de la distancia de transporte.

Figura 7-5 Rendimiento Efectivo con Sistema AutoMine Sandvik



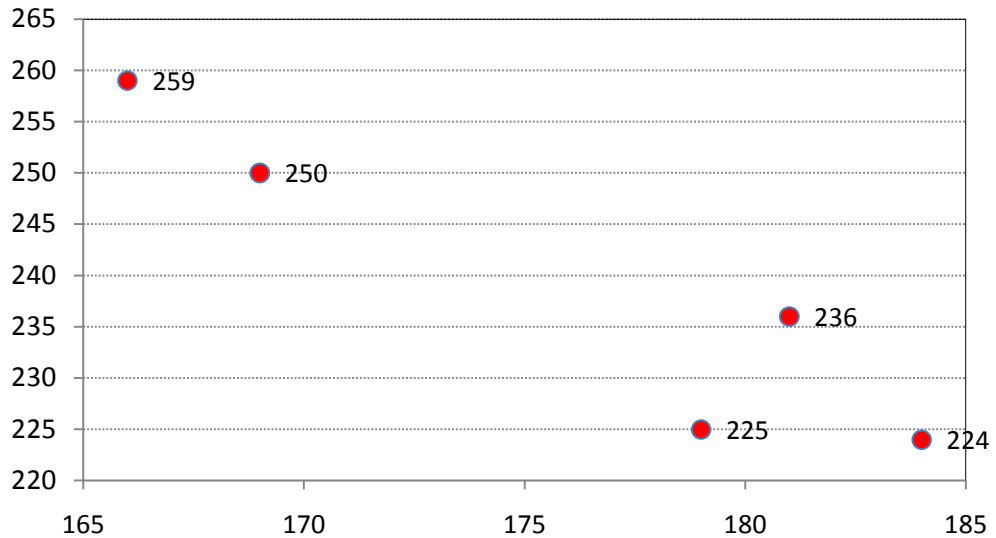
Distancia y Rendimiento

Las distancias han ido en aumento a medida que avanza el término de vida productiva del sector, la menor distancia de 224 (m) obtuvo el mejor rendimiento del período analizado, siendo en el año 2010, con un rendimiento efectivo de 184 (ton/hr Efectiva).

Tabla 7-5 Relación Rendimiento Equipo Semi-Autónomo y Distancia

Años	2009	2010	2011	2012	2013
Rendimiento Flota SA (ton/hora)	179	184	181	169	166
Distancia (m)	225	224	236	250	259

Figura 7-6 Rendimiento Equipos LHD SA Pipa Norte 2009-2013



Costo de Proceso de Extracción LHD

El Costo de extracción de LHD con sistema Automine ha sido más alto que los considerados por el proyecto, dado que estos contienen más partidas; los costos que no se consideraron son:

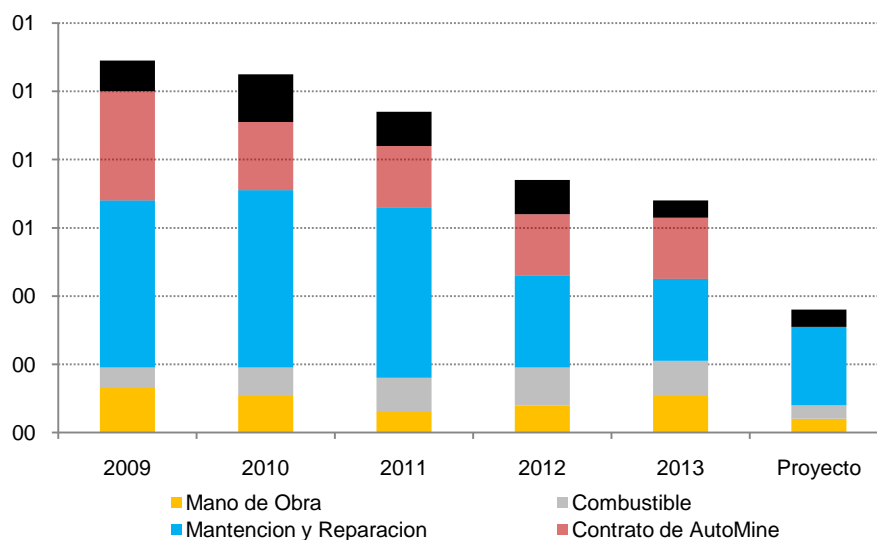
- Mantenimiento sistema Automine, 0,17-0,18 (US\$/Ton)
- Depreciación LHD, 0,18-0,14 (US\$/Ton), depreciación acelerada.
- Aparte se subestimaron otros costos de operación, con las siguientes desviaciones:
 - Combustible: 0,05 (US\$/Ton); mayor gasto de combustible de los equipos
 - Mano de Obra: 0,06 (US\$/Ton); mayor dotación a la considerada en el proyecto.
 - M&R: 0,17 (US\$/Ton), desviación por mantenimientos mayores a los equipos para aumentar su vida útil en 10.000 horas adicionales.
 - Servicios y suministros: 0,05 (US\$/Ton), mayor gasto en neumáticos por pinchazos, servicios de terceros, etc.

El proyecto no consideraba el costo de mantenimiento del sistema Automine en el sector, tanto en la ampliación de las zonas de operación, mantenimiento de Hardware en los equipos y en las zonas.

El proyecto consideraba una vida útil de las palas de 36.000 horas, sin embargo, el deterioro de los equipos fue evidente por muchos EQ/AC en períodos anteriores a los analizados lo que generó una mantención mayor entre los años 2010-2011 a las palas LHD 801-802-803 que en promedio tenían 24.650 horas horómetro, para aumentar su vida útil en 10.000 horas adicionales, lo cual incrementó fuertemente el costo de M&R en los períodos señalados.

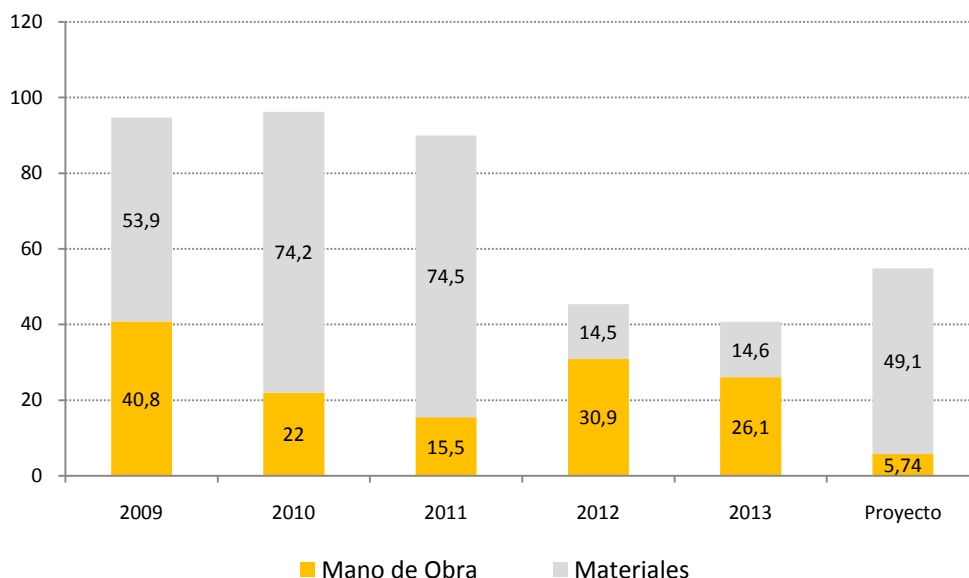
Si a esto, se agrega que no se cumplió con la meta de 10.000 tpd, también aumenta la brecha del costo.

Figura 7-7 Costo Total Operación SemiAutónoma Sector Pipa Norte



Los costos M&R expresados en US\$/Hr Efectiva, muestran valores por sobre los 90 (US\$/Hr Efectiva) durante los tres primeros años de análisis, mientras que en los dos siguientes se evidencia una notable disminución – por debajo de los 50 (US\$/Hr Efectiva) de los mismos a consecuencia de la renovación de equipos en el parque.

Figura 7-8 Costo M&R LHD SA Pipa Norte



Resumen Indicadores del Proyecto v/s Operación Real 2009-2013

En la tabla siguiente, se muestra el resumen de los indicadores del proyecto y los reales obtenidos:

Tabla 7-6 Indicadores Operación SemiAutónoma

Indicador	Unidad	Proyecto	2009	2010	2011	2012	2013	Observaciones
Disponibilidad Flota	%	80%	81%	76%	74%	79%	79%	Envejecimiento del parque 2010-2011-2012-2013 reemplazo de dos equipos.
Utilización Efectiva	%	86%	43%	56%	57%	51%	49%	Interferencias Estructurales no consideradas en el proyecto. Interferencias no estructurales
Rendimiento Efectivo	Ton/ hrEfect.	237	179	184	181	169	166	Menor velocidad 14 km/hr vs 20 km/hr Factor de balde
Productividad Proceso	tpd/HI	2500	744	711	754	808	741	Proyecto no consideró operador en terreno par mover equipos fuera del sistema. Producción menor a la solicitada por el proyecto (10.000 tpd vs 6.670 tod)
Costo Operación Proceso	US\$/ton	0,34	0,89	1,04	0,94	0,92	0,83	Reparaciones mayores a equipos en años 2010-2011. Proyecto no consideró Mantención del Sistema Automine.

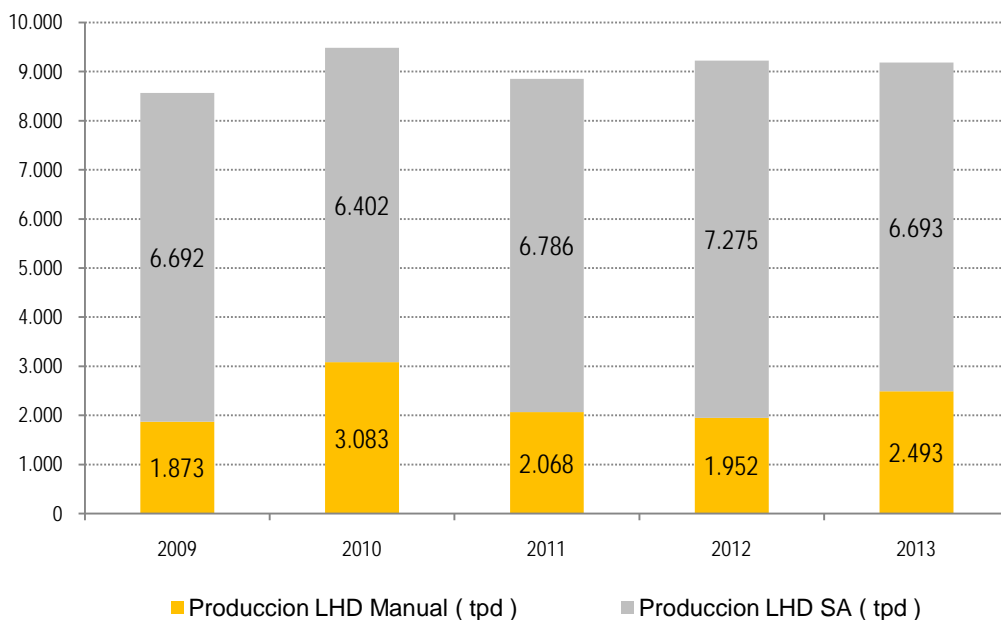
Producción con Sistema SA (AutoMine) y Operación Manual

El Proyecto original consideraba 10.000 toneladas por día (tpd) con tres LHD 13 yd³ operando en forma semi autónoma a un solo punto de vaciado, esta producción era en régimen entre los años 2005 al 2009.

Dado el desconocimiento de la tecnología y de los equipos, este parámetro no se pudo concretar con equipos semi autónomos, de las 9.063 tpd entre los años 2009 – 2013, los equipos semiautónomos aportaron con 6.770 tpd.

Las desviaciones se deben también por los presupuestos de cada año que exigían una menor producción al sector. En el gráfico se muestra la producción por año, tanto con LHD SA y manuales:

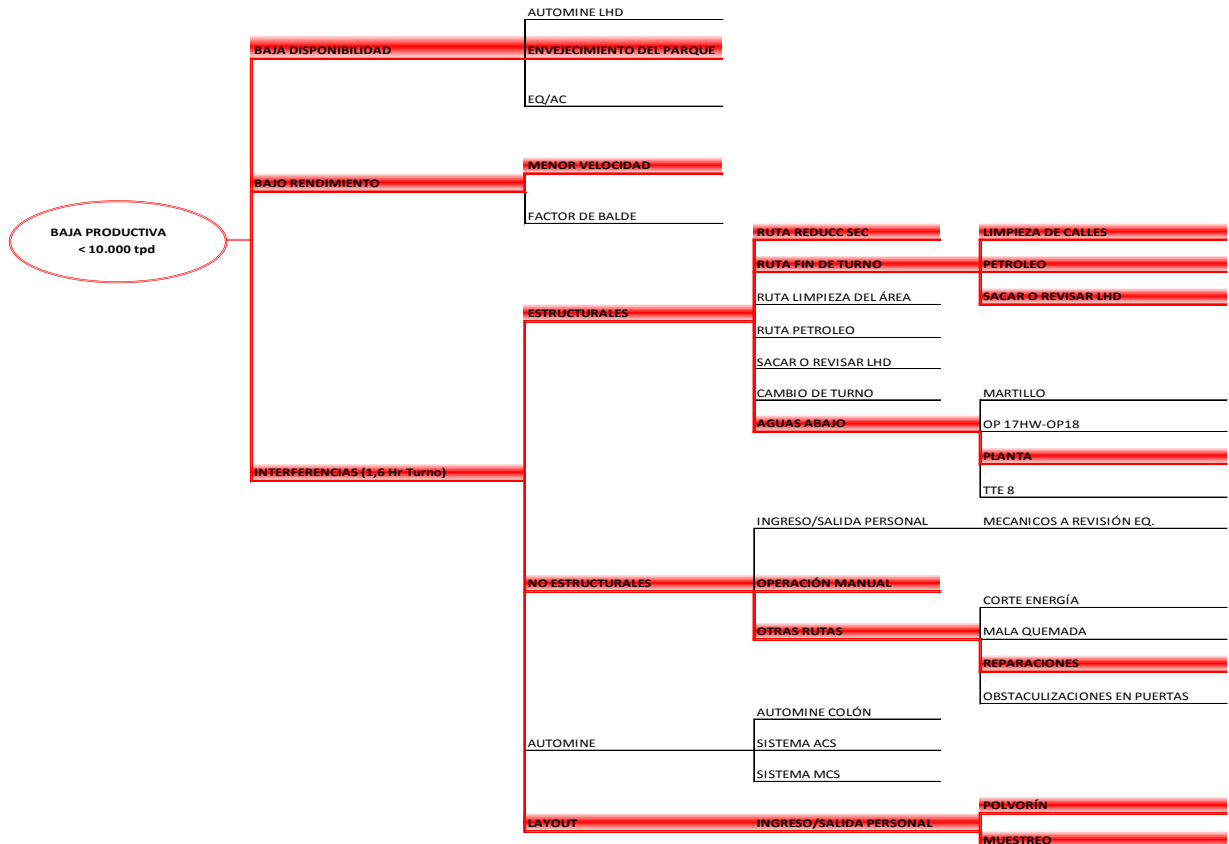
Figura 7-9 Producción Sector Pipa Norte (toneladas por día)



Árbol de Causalidad

En la búsqueda de las principales pérdidas operacionales por el no cumplimiento de lo comprometido por el proyecto, se ha podido determinar cuáles han sido las mayores causas por la cual la producción de Pipa Norte no pudo ser cumplida absolutamente por los Equipos LHD-SA, lo que se mostrará gráficamente la base del problema que es la baja producción, para luego mostrar cada uno de los motivos y los sub motivos hasta llegar a los principales.

Figura 7-10 Arbol de Causalidad de la Productividad Operación SemiAutónoma.



El árbol de causalidad muestra varias rutas críticas, en las cuales se destacan los tiempos más significativos.

- La disponibilidad, el impacto mayor es el envejecimiento del parque.
- El rendimiento, fundamentalmente es la velocidad.

Las interferencias, se tiene varias ramas, las cuales destacan los tiempos:

- Estructurales: Ruta de fin de turno, Reducción Secundaria.
- No estructurales: Ingreso y salida de personal, Operación Manual, Otras Rutas.
- Layout: Ingreso a Polvorín y Aguas abajo.

A través del Árbol de causalidad se analizó las variables que inciden en la producción del sector, esto da pie para analizar el cómo mejorar la forma de operación.

La realidad operacional, en los últimos 5 años de la operación con Automine, muestra ciertas brechas entre el proyecto y lo que efectivamente registra la operación, las razones principales de estas desviaciones son:

- Subestimación en los costos M&R del sistema Automine del proyecto, el proyecto no consideraba el costo de mantener el sistema en el sector, tanto en la ampliación de las zonas de operación, mantención de Hardware en los equipos y en las zonas, esto representa 0,18 (US\$/ton) aproximadamente y el de depreciación que equivale en los últimos años a 0,16 (US\$/ton).
- Velocidad máxima de los equipos sobreestimada (20 Km/hr del proyecto versus 14 Km/hr real), esta variable está directamente relacionado con el rendimiento de los equipos.
- Fuerte subestimación de interferencias operacionales en el proyecto (no consideraba interferencias) con respecto a la realidad, lo que incidió negativamente en la utilización (Interferencias reales 1,6 horas/turno).
- Subestimación en la dotación, el proyecto no consideró un operador por turno para apoyo del sistema en terreno.
- Zona en Transito, una sola entrada para varias zonas causa cuellos de botella por demoras en la entrada al Sector.
- Layout no apto dado que se consideró el Polvorín dentro de las zonas de automine.

Lecciones Aprendidas:

- No colocar polvorín ni otra instalación dentro de zonas con automine, que involucre interrupción al proceso productivo.
- Diseñar el sistema con más zonas en tránsito; idealmente una zona en tránsito por zona de operación.
- Que la cantidad de calles por zonas sea similar; idealmente una zona por calle.
- Piques de vaciado, ideal dos por calle como mínimo.
- Gestionar las Interferencias.
- Gestionar el perfil de equipos al igual que un sector manual.
- Probar mayores velocidades de Palas LHD en sistema Automine.

8. EFECTOS E IMPACTOS EN AUTOMATIZACIÓN EQUIPOS.

En resumen los ejes que resaltan en la generación de mayor valor en el modelo operacional semiautónomos, son:

Mayor Utilización del área activa.

Una mayor utilización del área implica una mayor velocidad de extracción operacional. Esto es factible en cuanto a que se produce en forma simultánea en más de un módulo por calle, lo que incrementa la utilización del área productiva de una calle, reproduciéndose esto en las demás calles de un bloque ó área productiva.

Simultaneidad operacional.

Es necesario una filosofía operacional de módulos que permitan realizar cachorro y reducción secundaria en la misma calle. Adicionalmente, se efectúan otras actividades de soporte no productivas en un módulo y con producción en los módulos adyacentes de la calle.

Continuidad operacional.

Se aumenta la continuidad operacional, incorporando un sistema de gestión de turnos que aproveche las características de los LHD semiautónomos, con “operación manilla-manilla”, junto con una estrategia operacional, estrategia de mantenimiento y confiabilidad que mantenga la disponibilidad de la operación semiautónoma en los módulos, para tener la mayor cantidad del tiempo productivo disponible.

Aumento de productividad.

El diseño y planificación ad-hoc del Modelo Operacional que permita de manera sistemática tener una mayor productividad del área abierta, junto con las nuevas funcionalidades de la automatización que generan mejores factores operacionales (disminución de tiempos de ciclos para aumentar los rendimientos, aumentos de la utilización y disponibilidad)

Variabilidad operacional.

Con menor variabilidad operacional es posible realizar lo que se planifica – generando una mayor Confiabilidad del Plan de Producción. Esto es factible, debido a que la tecnología en las actividades autónomas de transporte y descarga del ciclo de trabajo, ha demostrado tener una baja variabilidad (del orden de un 5 a 10%). Se requiere también que la tecnología tenga una alta confiabilidad, disponibilidad y continuidad operacional, que haga que el proceso de extracción en los módulos productivos tengan bajas interferencias y pérdidas operacionales.

Principales Actividades de la Realización Prueba Industrial.

En resumen es necesario validar los principios, componentes, funcionalidades y desempeños del Modelo Operacional de Minería Semiautónoma con LHD SA (con desarrollos tecnológicos a 1 a 2 años plazo), requeridos para su incorporación en los proyectos estructurales PNNM, PMCHS y en las Operaciones actuales. Para ello es necesario abordar las siguientes macro actividades:

- Ingeniería de detalle de Constructibilidad y preparación de las pruebas con LHD Semiautónomos y Camiones Autónomos de Esmeralda.
- Desarrollo con los proveedores de las nuevas funcionalidades y mejoras tecnológicas de automatización.
- Ejecución y evaluación de la Prueba Industrial del Modelo Operacional de LHD Semiautónomos.
- Ejecución y evaluación de Prueba Industrial del Modelo Operacional de Camiones Autónomos.
- Modelo de Escalabilidad de la Minería Semiautónoma Aplicada a los Proyectos PNNM, PMCHS y la División El Teniente.
- Certificación de la validación del Modelo de la Minería Subterránea Semiautónoma por una comisión externa independiente.
- Cierre del proyecto.

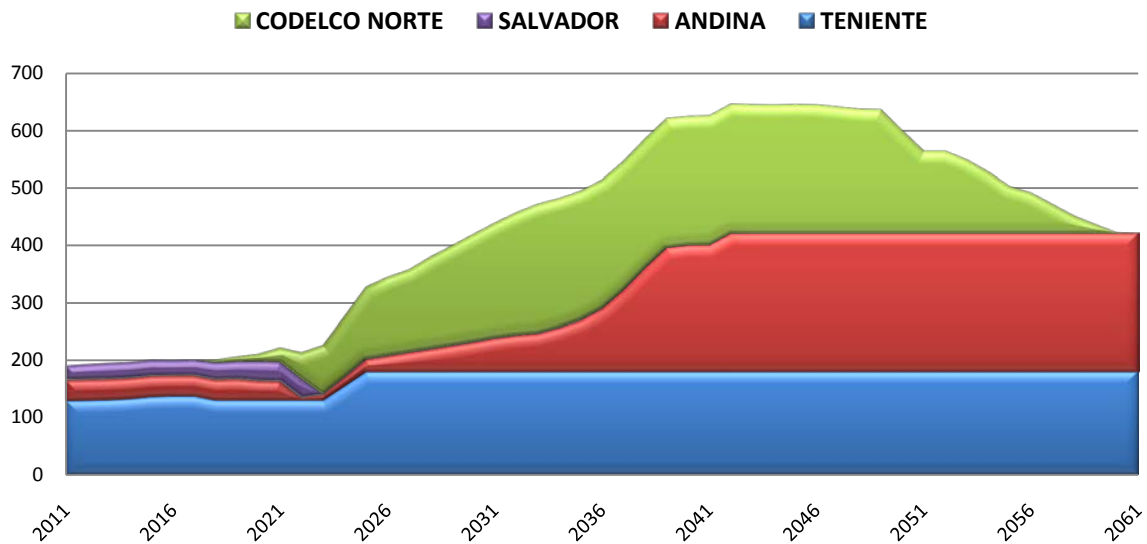
Tabla 8-1 Programa Validación del Modelo Operacional Semiautónomo

Validación del Modelo Operacional de Minería Subterránea Semiautónoma.
Ingeniería de Detalle de la Prueba de Validación Industrial del Modelo Operacional de Minería Subterránea Semiautónoma.
Gestión del Cambio Tecnológico.
Desarrollo de la Tecnología de LHD SA.
Pruebas de validación en Fábrica de LHD SA. (Pruebas FAT)
Preparación, instalación y habilitación de Módulos Semiautónomos de la Prueba Industrial.
Ejecución de la Prueba de Validación Industrial del Modelo Operacional en dos Módulos.
Control, Seguimiento y Evaluación de la Prueba Industrial del Modelo Operacional.
Análisis de Resultados y Conclusiones de la Prueba de validación Industrial.
Diseño de Escalamiento para Proyectos Estructurales y Operaciones del Modelo de Operación.
Ingeniería de Escalamiento del Modelo Operacional al Proyecto Estructural.

Caso de Negocio.

Los planes de negocios de la Corporación presentan un incremento sostenido y continuo de producción de minería subterránea, con la implementación de los proyectos estructurales Nuevo Nivel Mina, Chuquicamata Subterráneo, Ministro Hales Subterráneo y Sur Sur Subterráneo, todos los cuales representan un campo de predominancia para la implementación del Modelo Operacional de la Minería Subterránea Semiautónoma.

Figura 8-1 Perfil de producción subterránea en Codelco, PND 2013



En la gráfica anterior se puede ver la proyección del plan de producción en la extracción por métodos subterráneos que tiene la Corporación en una visión de largo plazo. A nivel global, en el PND 2013 aprobado por el Ministerio de Hacienda, tiene en el período 2017-2019, la puesta en marcha e implementación de los proyectos el Nuevo Nivel Mina (2017, con una producción máxima de 137 ktd), Chuquicamata Subterránea (2019, 140 ktd), mina Ministro Alejandro Hales Subterráneo (2023, 70 kton) y el Proyecto Sur Sur Subterráneo (2026, 69 ktd). Cabe también señalar que en el mediano plazo, la producción en Codelco provendrá mayoritariamente de las minas subterráneas, las que actualmente representan sólo el 30% de la producción.

Todos los Proyectos estructurales anteriormente señalados, requieren de un Modelo de Operación que obtenga el mayor valor y confiabilidad de la aplicación de la tecnología de automatización en gran escala en sus proyectos, para implementar un quiebre de innovación tecnológica, que corresponde a las primeras aplicaciones en estas magnitudes y exigencias productivas a nivel mundial.

Complementariamente en la declaración de la Visión de Codelco, (2011), la Administración de la compañía ha comprometido las siguientes directrices para el próximo quinquenio (Visión de Codelco 2015).

- **Innovación:** Somos líderes en innovación, incorporando continuamente nuevas tecnologías en nuestros procesos.
- **Productividad:** Gran progreso en productividad. A partir de 2010, incremento de 30%.
- **Seguridad:** Índice de Frecuencia menor a 1 y procesos peligrosos automatizados.
- **Salud Ocupacional:** Erradicar la silicosis
- **Costos:** Promedio en el nivel inferior del 2do cuartil de la curva de costos de la industria.

Para alcanzar esta visión, es imperativo, efectuar un desarrollo incremental de la tecnología de automatización y validar el modelo operacional que se propone para su implementación en los futuros proyectos estructurales, que serán gravitantes a partir de fines de la presente década.

Ambos proyectos, para alcanzar sus planes de producción, en la operación de extracción tienen una significativa demanda de flotas de LHDs. El PMCHS tiene un requerimiento de una flota máxima cercana a 38 equipos, que a lo largo de la vida del proyecto tiene un plan de adquisición de 212 equipos. Por su parte el PNNM tiene una flota máxima de 56 equipos, con una adquisición de 253 equipos a lo largo del proyecto.

En este contexto el desafío planteado es tener una Minería Subterránea Semiautomata lo más eficiente y productiva posible, con el mínimo de personal en interior mina, de manera de reducir los riesgos de seguridad y salud ocupacional. Estos últimos riesgos, son generados por ambientes contaminados con polvo silicogénos y gases, como también se eliminan las lesiones y enfermedades lumbares producidas por las vibraciones por la operación de equipos como son los LHD con operadores a bordo.

Para ello se requiere que las operaciones con LHD Semiautónomos tengan una alta confiabilidad y productividad, asegurando el plan de producción y que éstas sean planificadas, programadas, controladas, operadas y asistidas en forma centralizada y remota desde fuera de la mina, con una mantención preventiva, apoyadas con sistemas de autodiagnóstico y control en-línea de variables críticas. Esto implica una concepción diferente de la forma de operar la mina, en cuanto a la organización, dotaciones, competencias distintas y cultura operacional. Requiere una modificación del diseño y layout de la mina, con operaciones y actividades que aseguren la mínima interferencia, pérdidas operacionales y fallas, con equipos de apoyo, dispositivos y formas de trabajo, que aseguren obtener la mayor utilización, disponibilidad y rendimiento de los módulos aislados con equipos automatizados.

El Modelo de Negocio y desarrollo tecnológico, tiene como objetivo llevar la tecnología al estándar de funcionalidades y desempeños que aseguren la implementación de ésta tecnología en los proyectos estructurales, mejorando su integración en la planificación

y gestión de producción y minimizando la dependencia tecnológica con empresas fabricantes.

Las principales características de los proyectos estructurales, de CODELCO que tienen la oportunidad de negocio en la inclusión de la tecnología de LHD semiautónomos son:

Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS):

Proyecto estructural y estratégico de Codelco. Consiste en la transformación del rajo abierto a una operación subterránea que permitirá explotar parte de los recursos que quedarán bajo el actual yacimiento. Bajo el rajo se han cuantificado cerca de 1.700 millones de toneladas en reservas de mineral de cobre (ley 0,7%) y molibdeno (499 ppm), que representan más de 60% de lo explotado en los últimos 90 años. La opción técnica y económica aconseja explotar esas reservas a través de la construcción de una mina subterránea, cuya extracción considera la utilización masiva de LHD, con una flota máxima de 38 equipos.

El proyecto considera la explotación por medio de macro bloques, con el proceso de extracción “block caving”, en una mina subterránea que comprende cuatro niveles de producción; con un túnel de acceso principal, de 7 kilómetros; siete rampas de inyección de aire limpio, y tres piques de extracción de aire viciado, entre muchas otras obras. Asimismo, prevé una tasa de producción en régimen de 140.000 toneladas de mineral por día (tpd), lo que significará una producción anual de fino de 340.000 ton de cobre y más de 18.000 ton. de molibdeno.

El rajo dejará de operar el año 2018. La inversión total estimada asciende a US\$ 2.100 millones y las dotaciones se estiman en un máximo de 4.000 personas, tanto para la construcción del proyecto como para la operación. El peak de producción asciende a 380 mil toneladas anuales.

Nuevo Nivel Mina División El Teniente (NNM):

Uno de los cuatro proyectos estructurales de Codelco, Nuevo Nivel Mina (NNM) consiste en ampliar la mina El Teniente en un sector más profundo del cerro (cota 1.880 msnm), sumando una nueva superficie de dos millones 500 mil metros cuadrados y asegurando la continuidad operacional de la División El Teniente, con una extracción del mineral que utiliza en forma masiva LHD con una flota máxima de 58 equipos de 10 yd³, con 253 equipos y el transporte intermedio de mineral con camiones de 60t. con una flota máxima de 52 camiones, con una adquisición de 259 equipos en total.

El proyecto NNM suma 2.500 millones de toneladas de reservas, con una ley media de cobre de 0,84%, que se traducen –en un período de 62 años de operación contados desde 2017- en más de 20 millones de toneladas de cobre fino. La configuración del proyecto contempla una explotación a través del sistema panel caving, con un esquema de niveles típico de la mina El Teniente: hundimiento, producción, ventilación, acarreo y chancado, con la diferencia que, en este caso, el mineral va a ser sacado a superficie – al concentrador Colón- a través de un sistema de correas transportadoras.

Nuevo Nivel Mina permitirá mantener la capacidad de El Teniente en las actuales 137.000 toneladas por día (tpd), que equivalen a una producción en régimen en torno a 430.000 toneladas de cobre fino al año. Y deja abierta la opción, hacia el año 2020, de tomar la decisión de iniciar las obras necesarias para poder llegar a producir 180.000 tpd.

Los principales factores que impulsan el sentido y objetivo de la operación con equipos LHD semiautónomos son:

Alineamiento Estratégico.

- Como parte de la Estrategia de Codelco, los Proyectos Estructurales PNNM y PMCHS, tienen considerado sacar al personal de la operación de la línea de fuego (alto riesgo), utilizando las tecnologías de LHD SA y Camiones Autónomos.

Validación del Modelo de Minería Subterránea Semiautónoma (LHD SA).

- El Modelo de Minería Semiautónoma con LHD SA y Camiones autónomos que ha sido conceptualizado requiere ser validado industrialmente para ser escalado y aplicado en los proyectos futuros.

Mejoramiento de Brechas.

- Los compromisos en los parámetros de desempeños de los equipos autónomos considerados en los proyectos estructurales presentan brechas respecto de las pruebas pilotos y aplicaciones efectuadas en Codelco.
- Se requiere un desarrollo de nuevas funcionalidades y mejoras tecnológicas, probarlas y validarlas para mejorar los desempeños de productividad (rendimientos (t/h), tiempo efectivo (hrs/tno) y disponibilidad).

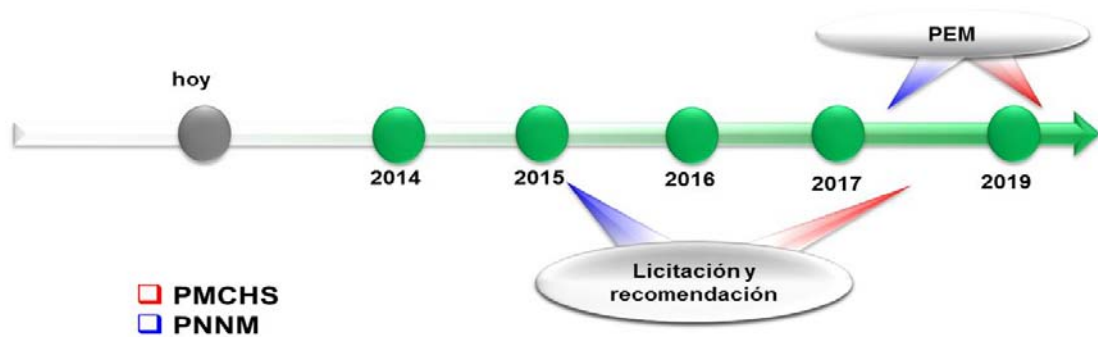
Impulsar el Mercado Tecnológico.

- El estado de madurez de la tecnología de los proveedores no está disponible para cumplir los requerimientos de los proyectos de Codelco.
- Se requiere de un liderazgo tecnológico de Codelco para impulsar el desarrollo del mercado para que se satisfagan sus requerimientos que son únicos en la industria minera por hundimiento de bloques mediante un Modelo de Negocios diseñado ad-hoc.
- Por la magnitud de las operaciones en los proyectos estructurales se requiere desarrollar más de un proveedor que satisfagan los requerimientos tecnológicos, para disminuir los riesgos tecnológicos y evitar poderes monopólicos mediante la competencia.

Oportunidad

El cronograma de los proyectos estructurales requiere implementar el “**Modelo Operacional de Minería Semiautónoma**” validado para su implementación en la puesta en marcha 2017 y 2019 de los proyectos PNNM, PMCHS. Considerando que la experiencia en los desarrollos tecnológicos de esta envergadura son largos, se requiere iniciar los desarrollos de las nuevas funcionalidades y la validación a más tardar a partir del año 2015.

Figura 8-2 Cronograma de Licitación y Puesta en Marcha Equipos Autónomos Proyectos Estructurales.



8.1. EVALUACION ECONOMICA DE IMPLEMENTACION DE OPERACIÓN SEMIAUTONOMA EN EQUIPOS LHD.

El enfoque del impacto económico de la conveniencia de la realización de una prueba industrial para lograr las metas establecidas y comprometidas en los proyectos estructurales, es una mirada bajo la metodología denominada “Valor de la Información”.

El supuesto es que con la ejecución exitosa de la Ingeniería de mejoras y el desarrollo del Modelo Integrado de Aplicación la tecnología LHD SA se aplica industrialmente en toda la flota del PMCHS y el PNNM. Para efectos de esta evaluación, no está considerado en este análisis los beneficios de transferir estas soluciones tecnológicas al resto de las operaciones y proyectos de Codelco, a pesar de que en caso de éxito así será con seguridad. Tampoco se evalúa la aplicación industrial de Camiones Semiautónomos en las operaciones y proyectos, ni los beneficios potenciales de la minería subterránea autónoma.

Pese a que uno de los impactos de mayor importancia en la justificación del proyecto es la de seguridad y salud ocupacional, se realiza una evaluación económica referencial, sin incluir los efectos económicos de esta variable, en cuanto a la eliminación de riesgos propios de la operación en interior mina y de la exposición de adquirir enfermedades profesionales.

Se identificaron tres ejes de valor sobre los cuales tiene impacto la realización de una prueba y validación de la operación, los cuales son independientes entre sí, por lo cual sus efectos podrían ser sumados para valorar el impacto total.

Los tres ejes de valor son:

- Mejora indicadores de productividad y/o costos del proyecto.
- Elimina Riesgo de Pérdida de Valor del Proyecto, asegurando los KPI del Proyecto.
- La mejor utilización de área, incide en una menor área activa y por tanto un menor costo.

Sin embargo, se debe hacer notar que solo el primer eje de valor es 100% sumable al VAN del proyecto base para el cual se calcula, ya que constituye una baja cierta en los costos de operación e inversión del proyecto, los dos últimos se consideran como beneficios potenciales de la incorporación de la tecnología.

Es importante tener presente que dos proyectos sobre los cuales la aplicación directa de la tecnología podría tener impacto sobre los ejes de valor antes descritos. Estos son:

- Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo. División Codelco Norte. (PMCHS)
- Proyecto Nuevo Nivel Mina. División El Teniente. (PNNM)

Mejora indicadores de productividad y/o costos del proyecto.

La evaluación se realiza cuantificando los menores costos de operación e inversión comparados con los casos base del proyecto Nuevo Nivel Mina, por tanto la evaluación económica está dada por el diferencial del VAC entre las siguientes alternativas:

A0) **Caso Base:** se considera el Valor actualizado de los costos de operación e inversión de los proyectos PNNM.

A1) **Caso con Proyecto:** se realiza la aplicación industrial lo que permite mejorar los índices de productividad considerados en los proyectos estructurales.

Por lo tanto se tendrá que:

Cálculo Ev. Económica : Esperanza de VAC diferencial entre el Caso sin Proyecto y el Caso con Proyecto.

Fuentes de Beneficios : Disminución costos de operación e inversión.

Se evalúan tres posibles escenarios, los cuales se definen en función de las expectativas de logro -pesimista, medio y optimista- de la validación industrial. Estos escenarios se evalúan respecto a la situación base definida en las Ingenierías de Factibilidad del PNNM, calculándose un valor actualizado de costos de operación e inversión (VAC) respecto de las ingenierías del proyecto. Los tres escenarios se describen a continuación.

Escenario Pesimista (EP): En este escenario la prueba de validación industrial diseñada y ejecutada, no es exitosa, por lo cual sus resultados no serán mejores a los ya logrados en la prueba que se realizó el año 2012 de LHD SA en DAND.

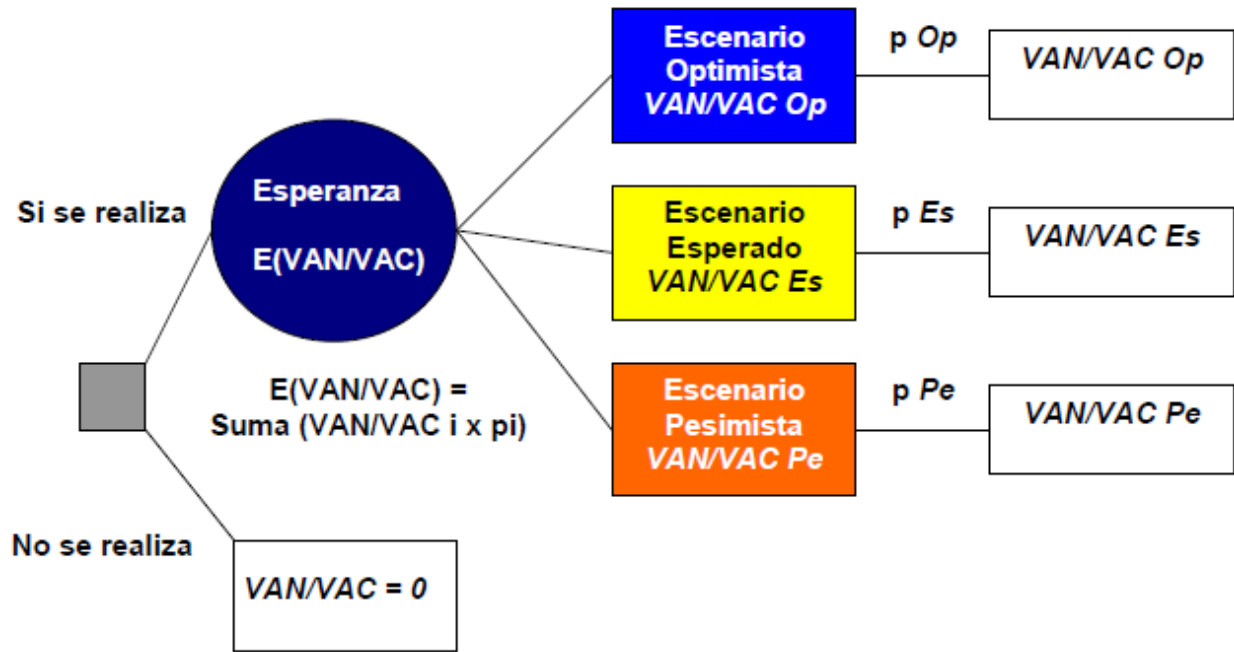
Escenario Medio (EM): En este escenario la prueba alcanza éxito solo en los ámbitos de gestión y entrenamiento de los operadores, mejorando el tiempo de ciclo del LHD SA.

Escenario Optimista (EO): En este escenario la prueba permite mejorar el rendimiento de los LHD SA. Las funcionalidades solicitadas a los proveedores de equipos tienen una incidencia directa en la disminución de los tiempos de carga, transporte y descarga del mineral.

Para calcular el VAC esperado, se debe definir una probabilidad de ocurrencia para cada escenario. La que se estima según criterio experto, y cuyo respaldo se detalla.

Así, el VAC esperado para cada uno de los proyectos se calcula mediante la siguiente fórmula, valores que se miden respecto al año 2014.

$$E(VAC) = 0,1 * VAC(pesimista) + 0,4 * VAC(medio) + 0,5 * VAC(optimista)$$



Este resultado se interpreta como que se espera que la validación industrial permita disminuir el valor actualizado de los costos de los Proyectos en la $E(VAC)$, lo que se ve reflejado en un aumento del VAN del proyecto en el mismo monto.

Los parámetros y las cifras de valor actualizado de costos de cada uno de los escenarios y proyectos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 8-2 Resumen de Evaluación Económica

Escenario	VAN (kUS\$)	PNNM	Probabilidad
Optimista	65.128		50%
Medio	28.822		40%
Pesimista	9.974		10%
E (VAN)	45.090		

Un elemento relevante a considerar es que la realización de esta propuesta está en Eliminar Riesgo de Pérdida de Valor del Proyecto, asegurando los Compromisos, el disminuir la probabilidad de igual pérdida potencial o disminuir la pérdida para el mismo nivel de certeza, es un beneficio que dependerá de la aversión al riesgo que tenga el dueño. Así la realización de poder invertir, se puede interpretar como la compra de un seguro equivalente a la inversión comprometida.

9. DISCUSION Y CONCLUSIONES

La aplicación de la tecnología semi-automática para la extracción de mineral con cargadores LHD en base a la experiencia de División el Teniente, ha logrado avances, pero lo realizado a la fecha no ha entregado los resultados esperados en el tema de la productividad del parque de equipos. Se ha demostrado que la tecnología es viable, segura y que mejora la calidad de vida del personal involucrado. Temas que son importantes para cualquier proyecto en minería subterránea y en particular para el proyecto estructural de la División. Es importante destacar que debido a que los altos ritmos de explotación que se espera lograr, hoy en día existe un desafío importante para poder alcanzar los rendimientos productivos comprometidos.

Del análisis realizado en esta tesis, se puede señalar que el proceso de extracción de mineral con LHD semiautomático todavía no entra en régimen y la tecnología aún está en etapa de maduración, lo que significa que al momento de definir la puesta en marcha de una implementación tecnológica de esta envergadura, se debe realizar una prolija consideración de esta etapa. Su complejidad significa tener un sistema automático en el tiempo y, en lo posible, emplear personal que esté libre de los paradigmas que deja la experiencia anterior es decir la operación manual.

La problemática de este tipo de equipos en la operación subterránea, se basa en la experiencia en el proyecto Pipa Norte en División El Teniente en el cual se identificó: sub-estimación de las perturbaciones que afectarían al sistema de operación, sobre-estimación de la velocidad de circulación de los equipos, estas son las principales debilidades presentadas en la puesta en marcha de esta tecnología.

Otras de las razones por la que los rendimientos de los cargadores LHD semi-automáticos en el sector productivo Pipa Norte en la actualidad aun estén por debajo de lo previsto en la ingeniería básica se encuentra en las interferencias por concepto de ruta segura, el alto nivel de fallas que alcanzan los equipos y además los valores de tiempos de Stand By que continúan siendo muy altos. Las mejoras en la actualidad se encausan en el ordenamiento operacional del sector, debido a que en este los problemas principales son por este concepto, situación que se asemeja al escenario esperable para el proyecto Nuevo Nivel Mina, razón por la cual es importante para el proyecto que los resultados al realizar una prueba estén encausados no solo al concepto operacional, sino que también a proponer líneas de acción de fondo para el sistema semi-automático.

La minería con operación semiautónoma está cerca de rendimientos aceptables para proyectos estructurales futuros (pero con alta variabilidad), la línea de acción estará enfocada poder identificar y generar una claridad en las brechas y lograr el mejor desempeño para alcanzar la ruta productiva.

Un elemento relevante a considerar es que la realización de esta propuesta de validación está en Eliminar Riesgo de Pérdida de Valor del Proyecto, permitiendo disminuir el valor actualizado de los costos de los proyectos en la estimación (Valor Actualizado Costos), lo que se ve reflejado en un aumento del VAN del proyecto en el mismo monto.

Al mismo tiempo que asegurar los compromisos, el disminuir la probabilidad de igual pérdida potencial o disminuir la pérdida para el mismo nivel de certeza, es un beneficio que dependerá de la aversión al riesgo que tenga el dueño. Así la realización de poder invertir, se puede interpretar como la compra de un seguro equivalente a la inversión comprometida.

El modelo operacional de minería semiautónoma es el pilar fundamental ya que en esta etapa se conceptualiza y optimiza el proceso de extracción, con equipos LHD Semiautónomos, operando y gestionándose desde fuera de la mina, mejorando sustantivamente las condiciones de seguridad y salud ocupacional de la operación, retirando al operador de la mina, evitando enfermedades de silicosis, ostomusculares y sin accidentes, alineado con el primer valor de Codelco “El Respeto a la Vida y Dignidad de las Personas”.

Para esto se plantea un diseño minero-operacional y tecnológico, que aumente la productividad laboral y de los activos, con una mayor capacidad productiva de las áreas con automatización, disminuyendo la variabilidad operacional, con un incremento en la velocidad de extracción a costos competitivos.

El modelo operacional semiautónomo se plantea a partir de un diagnóstico y evaluación de la aplicación con 3 LHD SA de Sandvik (Pipa Norte, El Teniente, 2004-2013) y las pruebas piloto de 1 LHD Semiautónomo en una calle del nivel de producción con los proveedores Caterpillar y Atlas Copco (III Panel, Andina, 2011-2012). De estas experiencias, se concluye que la tecnología ha demostrado ser factible de aplicar, sin embargo, en ninguna de ellas se cumplieron las metas definidas en los proyectos y pruebas.

Si bien, estos parámetros claves no son comparables entre sí, debido a que los diseños mineros-layout, condiciones de operación, distancias de acarreo, tamaño de equipos LHD, son diferentes, se debe resaltar que una de las principales conclusiones, es que la implementación de la tecnología de LHD Semiautónomos, requiere de un “Rediseño del Modelo Operacional de la Minería Semiautónoma” que permita optimizar y capturar el valor de la tecnología. En otras palabras, se condiciona la operación a una forma distinta de hacer minería, que abarca repensar todas las inter-relaciones sistémicas y actividades del proceso de extracción, para capturar el mayor valor de la tecnología, lo que implica un cambio significativo en:

- ✓ Diseños y planificación minera.
- ✓ Las estrategias y tácticas operacionales y de mantenimiento.
- ✓ Una gestión y control operacional centralizado.
- ✓ Nuevas funcionalidades para mejorar desempeños de los factores operacionales de flotas de LHD SA, entre las más relevantes.

Lo anterior en su conjunto, permitirá optimizar el uso de los LHD SA y tener una mina eficiente e integrada en sus procesos productivos, con el mínimo de personal en interior mina, de manera de reducir los riesgos de seguridad y salud ocupacional. Esto conlleva una Gestión del Cambio que permita generar un cambio cultural profundo en la forma de hacer la minería en las operaciones actuales y futuras.

De los análisis y evaluaciones también se detectaron brechas en los desempeños y funcionalidades de las tecnologías de Automatización de LHD, respecto de los requerimientos de los futuros proyectos estructurales, para lo cual, se requiere incorporar nuevos desarrollos tecnológicos a través de un programa de innovaciones incrementales de la tecnología, bajo un nuevo modelo de negocios, que aseguren y/o mejores los factores operacionales requeridos, como son: los rendimientos, la utilización, disponibilidad, con una eficiente gestión de grandes flotas, asegurando una baja y acotada variabilidad del proceso, para reducir los riesgos en el cumplimiento de los planes de producción.

Para la escalabilidad de la tecnología de LHD Semiautónomos, se deben abordar importantes desafíos y oportunidades de mejoramiento y desarrollo tecnológico, en cuanto a optimizar el ciclo de operación (carguío, control de derrames, navegación, operación en diferentes calles), desarrollo de protocolos de mantenibilidad & auto diagnóstico, con información en línea y estructurada para la toma de decisiones preventivas, reducir costos de mantención e inversión y el contar con la flexibilidad técnica de un sistema de control & comunicación que permita la operación con LHD de diferentes marcas/fabricantes, de manera de reducir la dependencia tecnológica con las empresas fabricantes.

Para lograr el desarrollo y la aplicación de esta tecnología como solución de extracción de mineral se deben tener presente los siguientes pilares:

- ✓ Modelo de Operación.
Cumplir metas de sustentabilidad, producción y costo.
- ✓ Modelo de Desarrollo Tecnológico
Programa de desarrollo de la tecnología con el fabricante asociado a los requerimientos presente en los proyectos estructurales.
- ✓ Modelo de Negocios.
Acuerdo comercial con los proveedores para el desarrollo tecnológico.

La innovación tecnológica progresiva hace posible obtener resultados continuamente, en forma incremental en el tiempo, además de que se controlan los riesgos en el desarrollo de la innovación. Esto favorece el aprendizaje y la adopción de las soluciones tecnológicas por parte de los diferentes actores internos.

Se plantea necesario y conveniente avanzar progresivamente en la obtención de las soluciones tecnológicas. Para esto se propone el esquema de desarrollo de la solución basada en etapas:

- ✓ Basado en equipos actuales con mejoras funcionales para el sistema de extracción.
- ✓ Basado en equipos con innovaciones de efectividad y mantenibilidad para el sistema de extracción.

Lo anterior está enfocado a mejorar las brechas de desempeño detectadas a través de mejoras o nuevas funcionalidades para implementar un adecuado desarrollo de la tecnología.

El desarrollo de la minería subterránea tiene grandes desafíos con la incorporación de los Proyectos Estructurales: Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) y Proyecto Nuevo Nivel Mina (PNNM). Estos proyectos entran en operación a partir del segundo quinquenio de la presente década, con niveles de producción y flotas de equipos autónomos, no vistos antes en el mundo de la minería. Para lograr altos estándares de seguridad y salud ocupacional, productividad y confiabilidad de los planes de producción, con costos sustentables y mejoras a la productividad laboral y de los activos, se ha considerado la automatización de sus procesos productivos.

En este contexto, se plantea avanzar en la automatización orientada a satisfacer los requerimientos establecidos por los Proyectos Estructurales Subterráneos en sus procesos de producción, por medio de una Validación Industrial del Modelo de operación de los LHD Semi-autónomos, obteniendo como producto : Modelo de operación con parámetros validados, continuidad y mantención del conocimiento en operación autónoma en la corporación e industria, modelos de escalabilidad de la minería Semiautónoma para los proyectos estructurales.

Dado que la única operación con LHD autónomos existente en la corporación – Pipa Norte- finaliza en 2014-2015, es relevante dar continuidad a la operación semi-autómata para mantener y aumentar la “masa crítica” de conocimiento en el uso de la tecnología de automatización, tanto en el interior de Codelco, como en los fabricantes y empresas de servicios, que serán vitales para la Puesta en Marcha de los Proyectos Estructurales.

La validación Industrial del Modelo de Operación de los LHD Semiautónomos, tiene un objetivo relevante que es: proveer de los parámetros y especificaciones técnicos necesarios para la licitación de equipos para Proyectos Mina Chuquicamata Subterránea (PCHMS) y Nuevo Nivel Mina (PNNM). Junto con eso, establecer una base para la generación de un plan de mediano plazo de desarrollo de la tecnología, generando una Ruta Tecnológica (Roap Map) de optimización del modelo de operación para ambos proyectos.

Es relevante señalar que el Proyecto Estructural Nuevo Nivel Mina de la División El Teniente, incorpora la utilización de grandes flotas de equipos LHD semiautónomos 58 equipos y una flota de 52 camiones autónomos de 60 ton con una producción en régimen del orden de 140 kton/día.

Lo anterior es un desafío tecnológico que representa una innovación en la minería, debido a que no existen minas con aplicaciones de estas tecnologías a escala de los proyectos estructurales de Codelco. Más aún, el grado de madurez y el enfoque de la tecnología de LHD semiautónomos en la industria minera ha sido orientada a aplicaciones en ambientes que son inseguros para los equipos tradicionales con conductor a bordo, por lo que no tienen requerimientos de alta producción, tienen bajos rendimientos – medidos en toneladas por hora- y en general, con flotas reducidas, menores a 6 equipos. En estas aplicaciones, la productividad de los equipos no es la variable relevante de desempeño.

El gran desafío que hoy nos impone la minería, de expandir la capacidad de producción para satisfacer las futuras demandas de mineral, está requiriendo con urgencia de un mayor desarrollo y apoyo de las tecnologías de automatización en la minería. La

dimensión de los proyectos permite generar cambios tecnológicos en pos de encontrar herramientas y sistemas que garanticen en mayor medida la calidad, eficiencia y control de las operaciones mineras. Es ahí donde está el desafío: identificar, adaptar, prepararse e implementar estas tecnologías.

10. BIBLIOGRAFIA

- **Codelco Chile.** Proyecto de Inversión Aplicación de la Operación Semiautónoma LHD y Camiones Subterráneos en División El Teniente. Marzo 2014
- **IM2,** Proyecto IM2 25-12 Informe “Resultados de las Pruebas LHD SA Caterpillar DAND y Sandvik DET” Junio 2012.
- **IM2,** Proyecto IM2 65-12 “Formulación Modelo de Operación Semiautónomo” Noviembre 2013.
- **IM2,** Proyecto IM2 65-12 “Diseño y Estrategia de Operación Minería Semiautónoma”, Octubre 2013.
- **IM2,** Proyecto IM2 65-12 Informe “Prueba Atlas Copco, Análisis Estadístico” Marzo 2013.
- **AMTC,** Informe Final “Análisis de las Fortalezas, Debilidades y Proyección de las Tecnologías de Automatización”, Agosto 2013.
- **Codelco Chile-IM2,** Informe Técnico “Especificación Técnica: Desarrollo Tecnología Alfa LHD Semiautónoma Mina Subterránea”, Enero 2014.
- **IM2,** Informe “Metodología de Gestión del Cambio de Nuevas Tecnologías de Quiebres en Procesos Mineros: Caso LHD Semiautónomos”, Octubre 2013.
- **Codelco Chile-Vicepresidencia de Proyectos.** Informe N09DM41-F13-CEOP-7150 INF GP08-2000-033 “Ergonomía Operación Tele-operada LHD y Martillos”, Junio 2013.
- **Codelco Chile–Vicepresidencia de Proyectos.** Informe N09DM41-I12-7141-INFM CO2-2000-005-B “Análisis de las Tareas de Mantenimiento, Equipos LHD SA PMCHS”, Octubre 2013.
- **Codelco Chile–Vicepresidencia de Proyectos,** Informe N09DM41-I12-GFIP CO2-2000-005-B “Análisis de Mantenibilidad y Confiabilidad, Protocolos de Pruebas, Sistema Semiautónomo Equipos LHD SA, Agosto 2013.
- **Codelco Chile -División El Teniente,** Informe SIM-I-094-11 “Cargadores LHD SA 13 Yd³ Pipa Norte 2010”, Oct 2011.
- **Codelco Chile-División El Teniente,** “Instrucciones de instalación mecánica control de acceso”, 2013.
- **Codelco Chile-TICA,** “Estándar Sistemas Comunicaciones Inalámbricas Sistemas Autónomos/Semi Autónomos Mina Subterránea”, 2013
- **Codelco Chile,** “Consideraciones y Recomendaciones de Diseño e Instalación para Sistemas de Confinamiento aplicables a Sistemas Autónomos / Semiautónomos Mina Subterránea”, 2012
- **REP-016-DG-11, V0,** “Extracción con LHD Semi Autónomo en División Andina”, División Andina, Junio 2010.
- **REP-016-DG-11,** “Informe Visita Técnica Extracción con LHD Semi Autónomo”, División Andina, Julio 2010.
- **Vicepresidencia Corporativa de Proyectos Codelco Chile T09E205-F1-VCPNMM-00000-INFAT02-0000-002-P,** “Informe Visita Técnica Sudáfrica Minas FINSCH (DE BEERS) y PALABORA (RIO TINTO)” Diciembre 2010.
- **Vicepresidencia Corporativa de Proyectos Codelco Chile. VCP-FI1-T09M416-INFME02-0000-001** “Estudio Técnico Económico Uso de Equipos LHD Semiautomáticos” Proyecto Diablo Regimiento Fase III, Marzo 2009.

- **T09E205-F1-VCPNNM-SCAF-00000-INFO07-0000-001-P** “Informe Análisis del Impacto en el Mantenimiento con Equipos Automatizados”, Enero 2009.
- **Superintendencia Mina Sur SMS-017/07** “Post Evaluación de Extracción con LHD Semiatomático Sectores Pipa Norte & Diablo Regimiento”, Agosto 2007.
- **Superintendencia Ingeniería de Minas SIM-I-151/2006** “Post Evaluación Simplificada API T01 M403 ITEM 1.3.1.1 Proyecto Pipa Norte: Palas LHD 13 YD3 y Sistema de Automatización”, Marzo 2007
- **División El Teniente – Codelco Chile** Informe “Análisis de Sustentabilidad de la extracción de mineral con equipos LHD Automáticos utilizados en Pipa Norte”, Agosto 2005.
- **División El Teniente–Codelco Chile.** Plan de Negocio y Desarrollo 2013.
- **División El Teniente–Codelco Chile** Informes Internos de Indicadores Operacionales Sector Pipa Norte. Superintendencia Mina Sur.
- **Información Técnica de Equipos proveedores Sandvik, Atlas Copco y Finning.** Marzo 2013.