



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

METODOLOGÍA DE AUTOMATIZACIÓN DE LHD EN MINERÍA DEL CAVING

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

HUGO ANTONIO VEGA ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:
RAUL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
JUAN LUIS YARMUCH GUZMÁN
JUAN CARLOS ACEVEDO CÉSPEDES

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magister en Minería**

POR: Hugo Antonio Vega Espinoza

FECHA: 11/11/2020

PROFESOR GUÍA: Dr. Raúl Castro Ruiz

METODOLOGÍA DE AUTOMATIZACIÓN DE LHD EN MINERÍA DEL CAVING

El presente estudio define estándares tecnológicos y criterios técnicos y operacionales que permiten establecer fundamentos para la aplicación de operación autónoma de equipos LHD en minería de Panel Caving.

En este sentido, el análisis realizado da cuenta del estado del arte de la tecnología de automatización de los equipos LHD en la minería del caving a nivel mundial y nacional, la definición de una línea base en su implementación (con la definición de un módulo inicial de operación) y su aplicabilidad en un proyecto actualmente en desarrollo con método de explotación tipo Panel Caving.

Sobre la base del estudio realizado se concluye que para efectos de minimizar las interferencias y maximizar los tiempos de utilización de los equipos automatizados, lo importante es definir módulos de operación, dentro de los cuales los equipos tendrán una configuración independiente del resto de las tareas o actividades de la mina.

Del mismo modo, para las minas en desarrollo y construcción, importante es definir un módulo inicial de operación que dé inicio tempranamente a la operación automatizada, con los consiguientes beneficios que ésta significa en términos de seguridad y productividad.

Todos estos módulos -y en general el diseño- deben considerar diferentes factores que permitan cumplir con lo anteriormente descrito, como lo son los criterios técnicos (configuración del sistema y equipamiento) y criterios operacionales (restricciones de construcción, producción e interferencias).

Este estudio propone una guía con definiciones de criterios para establecer un módulo inicial de operación y así agilizar e iniciar tempranamente la operación autónoma de equipos LHD en minería del Panel Caving.

ASBTRACT

LHD AUTOMATION METHODOLOGY IN CAVE MINING

This study defines technological standards, technical and operational criteria that allow to establish the baselines for the application of autonomous operation of LHD equipment in Panel Cave mining.

The analysis carried out shows the state of the art LHD automation technology in caving mining worldwide, it defines a baseline for the LHD automation technology implementation including the Initial Production Module definition and how they are applied in a Panel Caving project under development.

The basis of the study demonstrates that in order to minimize interference and maximize the utilization time of automated equipment, it is important to define operation modules, such that the equipment is independent configured and isolated from the other tasks or mine activities.

In addition, for mines under development and construction it is important to define an Initial Production Module with the aim of commencing automated operation earlier, such that consequent benefits in terms of safety and productivity are realized.

All the discussed modules and associated design take into account various factors such as technical criteria, which encompasses system configuration and equipment as well as operational criteria that manages the construction restrictions, production and development interaction.

This study proposes a defined guide to establish an Initial Production Module and starts the autonomous of LHD equipment early in Panel Cave mining.

Dedicado a mi familia, en especial a Ingrid y mis hijos, Ignacio y Matías.

Dedicado a mi padre, a quien siempre dedicaré mis logros.

Dedicado a mi madre, por su amor y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos quienes participaron y ayudaron en el desarrollo de este estudio, en particular al Profesor Dr. Raúl Castro.

Agradecer a mi empresa Codelco, por permitir y apoyarme en el desarrollo de este tema.

Y, por último -y no menos importante-, agradecer a mi familia por su apoyo y paciencia.

Gracias a todos.

Gracias a Dios.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Introducción..... | 1 |
| 1.2 | Motivación | 3 |
| 1.3 | Objetivos | 5 |
| 1.3.1 | Objetivo general..... | 5 |
| 1.3.2 | Objetivo específico | 5 |
| 1.4 | Alcance | 5 |
| 1.5 | Metodología | 6 |
| 2 | CAPÍTULO II: BENCHMARKING Y ESTADO DEL ARTE..... | 8 |
| 2.1 | Introducción..... | 8 |
| 2.2 | Conceptos de sistemas de automatización | 10 |
| 2.2.1 | Tipo de operación de sistemas de equipos LHD | 10 |
| 2.2.2 | Requerimientos sistemas LHD autónomo | 13 |
| 2.2.3 | Sistemas de navegación..... | 16 |
| 2.2.4 | Sistemas de automatización comerciales..... | 18 |
| 2.3 | Benchmarking faenas mineras en el mundo | 21 |
| 2.3.1 | Descripción operaciones mineras..... | 22 |
| 2.3.2 | Requerimientos..... | 26 |
| 2.3.3 | Rendimientos..... | 29 |
| 2.3.4 | Seguridad y reportabilidad..... | 30 |
| 2.4 | Experiencia en Codelco | 32 |
| 2.5 | Resumen benchmarking faenas mineras en el mundo | 35 |
| 3 | CAPÍTULO III: CRITERIOS DE DISEÑO PARA PALAS AUTÓNOMAS Y DEFINICIÓN MÓDULO INICIAL DE OPERACIÓN | 38 |
| 3.1 | Introducción..... | 38 |
| 3.2 | Criterios técnicos en el diseño de la automatización..... | 41 |
| 3.2.1 | Códigos y normas..... | 42 |
| 3.2.2 | Sala de control..... | 43 |
| 3.2.3 | Sistemas de control | 44 |
| 3.2.4 | Sistema gestión de la producción | 47 |
| 3.2.5 | Sistema de confinamiento | 48 |
| 3.2.6 | Red WIFI | 50 |
| 3.2.7 | Sistemas <i>On Board</i> | 52 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.2.8 | Zonas de registro | 57 |
| 3.3 | Criterios operacionales en el diseño de la automatización..... | 58 |
| 3.3.1 | Mantenibilidad y confiabilidad de los equipos en el diseño de la automatización | 59 |
| 3.3.2 | Interferencias operacionales en el diseño de la automatización..... | 60 |
| 3.3.3 | Requisitos de la construcción en el diseño de la automatización | 61 |
| 3.3.4 | Reglas operacionales a considerar en el diseño la automatización..... | 64 |
| 3.4 | Definición módulo inicial de operación | 66 |
| 4 | CAPÍTULO IV: EJEMPLO DE APLICACIÓN SISTEMA LHD AUTÓNOMO | 69 |
| 4.1 | Introducción: Proyecto Andesita - División El Teniente | 69 |
| 4.2 | Criterios técnicos..... | 73 |
| 4.2.1 | Sala de control..... | 73 |
| 4.2.2 | Sistemas de control | 75 |
| 4.2.3 | Sistema gestión de la producción | 75 |
| 4.2.4 | Sistema de confinamiento | 77 |
| 4.2.5 | Red WIFI | 78 |
| 4.2.6 | Sistemas <i>On Board</i> | 78 |
| 4.2.7 | Zonas de registro..... | 79 |
| 4.3 | Criterios operacionales..... | 80 |
| 4.3.1 | Mantenibilidad y confiabilidad | 80 |
| 4.3.2 | Interferencias operacionales..... | 84 |
| 4.3.3 | Actividades y requisitos de construcción | 88 |
| 4.3.4 | Reglas operacionales | 89 |
| 4.4 | Definición módulo inicial de operación | 91 |
| 5 | CAPÍTULO V: CONCLUSIONES | 98 |
| 5.1 | Conclusiones generales | 98 |
| 5.2 | Trabajo futuro..... | 100 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA | 102 |
| | ANEXO A: Presentación de este estudio en MassMin2020 | 105 |

ÍNDICE DE TABLA

| | |
|---|-----|
| Tabla 2-1: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (1 de 3) | 26 |
| Tabla 2-2: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (2 de 3) | 27 |
| Tabla 2-3: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (3 de 3) | 27 |
| Tabla 2-4: Rendimientos observados de LHD SA | 29 |
| Tabla 2-5: Seguridad y reportabilidad de equipos LHD SA (1 de 2)..... | 30 |
| Tabla 2-6: Seguridad y reportabilidad de equipos LHD SA. (2 de 2)..... | 31 |
| Tabla 2-7: Antecedentes de utilización de sistemas autónomos en minería subterránea | 35 |
| Tabla 3-1: Normas y entidades regulatorias internacionales..... | 42 |
| Tabla 3-2: Normas y entidades regulatorias chilenas..... | 43 |
| Tabla 3-3: Definición de módulo inicial de operación | 67 |
| Tabla 4-1: Definición de módulo inicial de operación. Proyecto Andesita | 94 |
| Tabla 4-2: Automatización de módulos | 95 |
| Tabla 5-1: Definición de módulo inicial de automatización..... | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1: Estación de trabajo de equipos operados a distancia | 2 |
| Figura 1-2: Metodología de investigación..... | 7 |
| Figura 2-1: Estrategia de análisis del benchmarking..... | 9 |
| Figura 2-2: Tipo de operación de sistemas de equipos LHD..... | 12 |
| Figura 2-3: Requerimientos sistemas LHD autónomo..... | 13 |
| Figura 2-4: Sistemas de navegación | 17 |
| Figura 2-5: Sistemas de posicionamiento | 18 |
| Figura 2-6: Automine System (Sandvik)..... | 19 |
| Figura 2-7: Minegem System (Caterpillar)..... | 20 |
| Figura 2-8: Scooptram Automation System (Epiroc) | 21 |
| Figura 2-9: <i>Layout</i> nivel de producción de Northpakes | 22 |
| Figura 2-10: <i>Layout</i> nivel de producción de Olympic Dam | 23 |
| Figura 2-11: <i>Layout</i> nivel de producción de Cadia East | 23 |
| Figura 2-12: <i>Layout</i> nivel de producción de Kiruna y Malmberget..... | 24 |
| Figura 2-13: <i>Layout</i> nivel de producción Proyecto Andes Norte..... | 25 |
| Figura 2-14: <i>Layout</i> nivel de producción Proyecto Chuquicamata Subterráneo..... | 25 |
| Figura 2-15: <i>Layout</i> nivel de producción Pipa Norte y Diablo Regimiento..... | 33 |
| Figura 2-16: <i>Layout</i> nivel de producción prueba Alpha en mina Esmeralda | 34 |
| Figura 3-1: Esquema general de operación a distancia | 39 |
| Figura 3-2: Ejemplo de estaciones trabajo en sala de control | 44 |
| Figura 3-3: Sistema de control de automatización | 46 |
| Figura 3-4: Sistema de gestión en producción | 48 |
| Figura 3-5: Barrera de confinamiento..... | 48 |
| Figura 3-6: Ejemplo de arquitectura de diseño red WIFI | 52 |
| Figura 3-7: Ejemplo equipamiento <i>On Board</i> típico..... | 57 |
| Figura 3-8: Ejemplo zona de registro | 57 |
| Figura 3-9: Proceso de extracción típico | 58 |
| Figura 3-10: Incorporación de área se acerca al punto de vaciado..... | 62 |
| Figura 3-11: Incorporación de área se aleja al punto de vaciado | 63 |
| Figura 4.1: Ubicación del Proyecto Andesita en mina El Teniente (vista isométrica). | 69 |
| Figura 4.2: Ubicación del Proyecto Andesita en mina El Teniente (vista planta) | 69 |
| Figura 4.3: Esquema del manejo de minerales del Proyecto Andesita | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4: Disposición general del nivel de producción del Proyecto Andesita..... | 71 |
| Figura 4.5: Zona a automatizar (azul) y ubicación tolvas de vaciado (rojo) del Proyecto Andesita | 72 |
| Figura 4.6: Operación de descarga de mineral en la Estación de Vaciado | 73 |
| Figura 4.7: Sala de control en superficie | 74 |
| Figura 4.8: Sala de control secundaria en interior mina | 74 |
| Figura 4.9: Esquema del sistema de control del Proyecto Andesita..... | 75 |
| Figura 4.10: Esquema del sistema gestión de la producción del Proyecto Andesita..... | 76 |
| Figura 4.11: Esquema del sistema <i>On Board</i> de las palas del Proyecto Andesita..... | 79 |
| Figura 4.12: Zonas de registro | 80 |
| Figura 4.13: Componentes de zona de registro | 80 |
| Figura 4.14: Dimensión de galerías y tamaño del equipo | 81 |
| Figura 4.15: Dimensión de estación de vaciado y tamaño del equipo..... | 81 |
| Figura 4.16: Traslado de equipo LHD a zona de registro | 82 |
| Figura 4.17: Falla del sistema LHD | 83 |
| Figura 4.18: Ingreso de equipos LHD a las calles o semi-calles | 84 |
| Figura 4.19: Operación de equipos LHD en las semi-calles..... | 85 |
| Figura 4.20: Cambio de semi-calle..... | 85 |
| Figura 4.21: Inversión de equipos LHD | 86 |
| Figura 4.22: Recorrido de LHD para carga de combustible | 87 |
| Figura 4.23: Carga de combustible equipo LHD..... | 88 |
| Figura 4.24: Preparación y desarrollos..... | 89 |
| Figura 4.25: Secuencia de incorporación Proyecto Andesita. | 91 |
| Figura 4.26: Secuencia incorporación de área Proyecto Andesita (años A) 2024; B) 2027; C) 2033; D) 2041)..... | 92 |
| Figura 4.27: Subdivisión de calles y módulos de producción | 93 |
| Figura 4.28: Secuencia de incorporación y su impacto en automatización | 93 |
| Figura 4.29: Configuración primera calle automatizada y calle aledañas no automatizadas | 95 |
| Figura 4.30: Configuración barrenas en zona divisional de semi-calles..... | 96 |
| Figura 4.31: Esquema de extracción con barrera oeste abierta | 96 |
| Figura 4.32: Esquema de extracción con barrera este abierta | 97 |

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La minería subterránea es una actividad que desde sus inicios ha ido experimentado innovaciones tecnológicas en sus procesos productivos y que se han enfocado en dos áreas principalmente: seguridad y productividad.

Referente a la seguridad, el objetivo central ha sido sacar o alejar al operador de las tareas críticas que puedan exponerlo a situaciones no controladas o que puedan poner su integridad física o salud en riesgo. Así, por ejemplo, numerosos son los casos en que un descuido del trabajador durante sus labores productivas ha provocado un accidente de importancia (colisión de equipos, atropellos, daño infraestructura) ocasionando incluso la muerte de uno más involucrados; como también casos de enfermedades crónicas profesionales relacionadas con las vías respiratorias (silicosis, neumoconiosis, asbestosis, silicatosis), audición (hipoacusia), entre otros.

Con el objeto de aumentar la seguridad y minimizar la exposición de los trabajadores, se ha considerado operar con equipos telecomandados (martillos de reducción secundaria y palas de producción, por ejemplo) que han mejorado las condiciones de vida de los trabajadores permitiéndoles operar los equipos a una distancia segura, según se puede observar en Figura 1-1. Es así como numerosas minas en el mundo presentan su sala de operaciones telecomandada en un lugar alejado de la operación: DOZ (Deep Ore Zone, Papua, Indonesia) la tiene en interior mina, pero sus proyectos GBC (Grasberg Block Cave) y DMLZ (Deep Mill Level Zone) en exterior mina; LKAB (Luossavaara-Kiirunavaara AB, Kiruna, Suecia) y Northparkes (Parkes, Australia) también la construyeron en exterior mina. En otros casos se opta por sacarlo de sus instalaciones y llevarlo a la ciudad cercana, como por ejemplo División El Teniente de Codelco Chile, en la que los operadores trabajan desde la Sala CIO (Centro Integrado de Operaciones) en la ciudad de Rancagua, a una distancia aproximada de 60 km. Lo mismo ocurre con División Andina de Codelco Chile y su centro de operaciones en la ciudad de Los Andes.

Por otro lado, en el ámbito de la productividad, las innovaciones tecnológicas han estado principalmente enfocadas en aquellas tareas que son consideradas repetitivas, complejas y/o rutinarias, y que han favorecido positivamente a la producción global de la mina. Asimismo, un aumento en el tiempo efectivo de trabajo también ha sido un aspecto que se ha logrado con la implementación de la tecnología y ha permitido aumentar los tiempos productivos efectivos y disminuir los costos.

Un ejemplo de esto corresponde al apoyo al despacho de los trenes en minas como El Teniente, LKAB y GBC, en que el trayecto del ferrocarril desde la zona de carguío al vaciado (y viceversa), es controlado completamente por un sistema automático que lleva

registro de las distancias entre ferrocarriles, velocidades, máquinas de cambio, zonas de espera, etc.



Figura 1-1: Estación de trabajo de equipos operados a distancia

Es importante mencionar que en el futuro la tendencia de la productividad apunta a disponer datos de procesos centralizados y aplicar inteligencia a los mismos. Un ejemplo de esto corresponde al *Machine Learning* que es parte del ámbito de la inteligencia artificial que crea sistemas que aprenden automáticamente (aprender en este contexto dice relación a identificar patrones complejos en millones de datos).

La creación de centros integrados de operación buscan materializar la opción de trabajar con inteligencia artificial, y el primer paso para llegar a este objetivo es lograr enviar información de sistemas a un servidor y centralizar modelos de operaciones autónomas y telecomandadas.

En consecuencia, y tratando de avanzar en la materialización de lo comentado anteriormente, las innovaciones tecnológicas han abarcado distintos procesos productivos de la minería subterránea, desde los desarrollos horizontales y verticales (por ejemplo: jumbos mecanizados, *raise borer*, *blind holes*, *box holes* y *tunnel boring machine*), hasta el manejo de mineral (por ejemplo: martillos de reducción secundaria, LHD, trenes, correas y chancadores), existe un ámbito que aún no se ha consolidado completamente y que abre una puerta a oportunidades de mejoras: la automatización del proceso de carguío, transporte y vaciado de los equipos LHD.

Adicionalmente, las operaciones mineras que han adoptado la automatización de equipos LHD han sido en método de explotación tipo Sublevel Stopping (SLS), Sublevel Caving (SLC) y Block Caving, donde en general los desarrollos en el nivel de producción son

realizados con anterioridad al inicio de la producción, por lo que no se evidencia interacción de actividades humana/automatizada.

Sin embargo, en minas con método de explotación tipo Panel Caving, los desarrollos de calles y zanjas se realizan en la cercanía de las actividades de producción, existiendo relativa convivencia de ambas operaciones. Este método de explotación será considerado como base para los análisis de este estudio.

La presente tesis de Maestría da cuenta del estado del arte de la tecnología de automatización de los equipos LHD en la minería del caving, la definición de una línea base en su implementación (módulo inicial de operación) y su aplicabilidad en un proyecto actualmente en desarrollo con método de explotación tipo Panel Caving.

En este sentido, el estudio se inicia con un benchmarking a nivel mundial con el objeto de comparar las distintas realidades operativas de los equipos LHD en diferentes minas y establecer una línea base o tendencia respecto a las condiciones bajo las cuales es implementada la tecnología de automatización de palas, con todos componentes asociados, y considerando variables de seguridad y productividad.

Posteriormente se levantará un estándar de operación apropiado y adaptado a recomendar para condiciones de minería subterránea tipo Panel Caving con el objeto de iniciar la operación de automatización de los equipos LHD.

Finalmente se expondrá un ejemplo de aplicación en un proyecto minero con método de explotación tipo Panel Caving actualmente en etapa de ingeniería de factibilidad, el cual considera la automatización como pilar de sus diseños.

Importante es señalar que los resultados de este estudio fueron expuestos y presentados en el MassMin 2020 bajo el título de “*Semiautonomous LHD operational philosophy for panel caving applications*” (Anexo A).

1.2 MOTIVACIÓN

Actualmente la minería está en proceso de transformación, profundizándose en la búsqueda de yacimientos, en la mayoría de los casos, con leyes de minerales cada vez menos atractivas, por lo que la automatización en la extracción de mineral se torna un elemento esencial y primordial en hacerlos rentables.

Las nuevas tecnologías son una herramienta vital para optimizar los procesos. Y sus pilares son fundamentalmente tres:

- La optimización económica y productiva en los procesos, al ocupar maquinaria en vez de fuerza humana para las tareas.

- La precisión, ya que normalmente los procesos automatizados son mucho más exactos y tienen excelente repetitividad, lo cual genera una mayor productividad de las maquinarias, procesos o plantas.
- La seguridad y salud ocupacional ya que la industria moderna intenta evitar que los seres humanos estén expuestos a riesgos en su ambiente de trabajo.

Estos tres factores son determinantes para que en la actualidad parte de los procesos o trabajos básicos de la industria minera cuenten, en mayor o menor grado, con cierta automatización en sus diferentes campos de trabajo.

Los beneficios de las tecnologías de automatización de equipos de minería son variados, pero pueden incluir: mejor estándar en términos de seguridad, mejor eficiencia de combustible, aumento de la productividad, reducción de mantenimiento no programado, mejores condiciones de trabajo, mejor utilización del vehículo y menor fatiga y desgaste del conductor (Uribe, P. 2014). Las tecnologías de automatización son una manera eficaz de mitigar los efectos de la escasez de mano de obra especializada para posiciones con alta demanda. Ante la caída de los precios de las materias primas, muchas compañías mineras están buscando maneras de reducir drásticamente los costos generales manteniendo la seguridad y la integridad del sitio. La automatización puede ser la respuesta.

Como se mencionó anteriormente, el caso particular de la automatización en los equipos LHD es un campo con un alto potencial de mejoras que no se encuentra estandarizado, como así tampoco se ha implementado en minas con método de explotación tipo Panel Caving en construcción. Por lo tanto, definir una línea base de operación en cuanto a los criterios a considerar en su diseño o filosofía operacional, permitirá gestionar de mejor manera los proyectos mineros.

En consecuencia, esta tesis se enfocará primeramente en analizar los requerimientos necesarios para lograr que los equipos LHD puedan disponer de modos de operación automatizados, siendo el principal de estos el modo autónomo, en una mina Panel en Caving. Las definiciones y lineamientos técnicos que permitan la materialización serán la base para establecer los objetivos de esta tesis.

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos generales y específicos se describen a continuación:

1.3.1 Objetivo general

Definir estándares y criterios tecnológicos que permitirán establecer fundamentos y ser una guía de diseño para la aplicación de operación autónoma de equipos LHD en minería de Panel Caving.

1.3.2 Objetivo específico

- Realizar un benchmarking de la automatización de equipos LHD en la industria minera (estado del arte).
- Identificar los criterios o definiciones que se aplican en las diferentes faenas mineras para la automatización de los equipos LHD, identificando las similitudes y diferencias en los diseños.
- Establecer una línea base de los criterios o fundamentos para el diseño de la automatización de equipos LHD en minería de Panel Caving, en particular la autonomía de éstos.
- Definición de un módulo inicial de operación que permita dar comienzo a la automatización en una mina que conviva con diferentes actividades.
- Desarrollar un ejemplo de aplicabilidad de una mina Panel Caving actualmente en construcción, analizando el diseño minero y tecnológico del sistema LHD autónomo considerado.

1.4 ALCANCE

El alcance de esta investigación es el siguiente:

- Se abordará el ámbito de la operación autónoma de los equipos LHD en minería de Panel Caving.
- Análisis de minas actualmente en explotación en el mundo que tengan un grado de automatización de equipos LHD, como mínimo de operación telecomandada.
- Se hará análisis de información y reportes de las pruebas realizadas en División El Teniente.

- Se abordarán exclusivamente los datos técnicos, obviando los parámetros económicos.
- Se establecerá una filosofía operacional con la definición de la instrumentación necesaria que viabilice una operación automatizada en una mina de Panel Caving.
- Se considerará los diseños mineros requeridos para la concreción de la automatización en equipos LHD.
- No se analizarán temas específicos asociados a la especialidad de electrónica. Solamente se revisará las implicancias que tienen en el diseño minero.

1.5 METODOLOGÍA

El propósito de la metodología es plantear pasos para lograr los objetivos generales y específicos. En consecuencia, el desarrollo de esta investigación se abordará en tres fases o etapas principales.

Primero se hará una revisión bibliográfica y un benchmarking con un barrido con la información existente de la aplicabilidad de la automatización en las principales faenas mineras de caving del mundo con el objeto de determinar un patrón común y/o rescatar las mejores soluciones de diseño y operatividad. Se contará con información disponible en Codelco y mercado (conferencias, seminarios y visitas a terreno).

Con la información recopilada, explicar estándares existentes y mejoras de los criterios y/o fundamentos para el diseño de la implementación de la operación autónoma de equipos LHD en minería de Panel Caving.

Finalmente se tomará un caso de ejemplo, el cual será un proyecto actualmente en desarrollo y que se encuentra en etapa de ingeniería de factibilidad.

Un resumen de la secuencia a abordar por la metodología se muestra en la Figura 1-2.

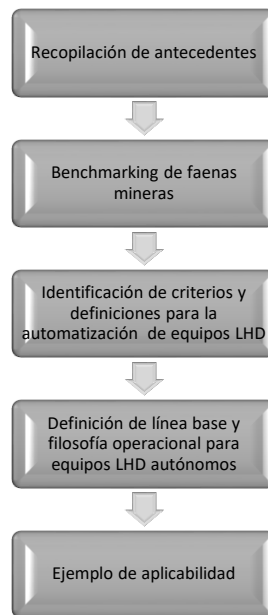


Figura 1-2: Metodología de investigación

2 CAPÍTULO II: BENCHMARKING Y ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo dar a conocer el estado del arte de la automatización de equipos LHD en minería subterránea a través de la recopilación de información de estos equipos mineros semiautónomos de los principales proyectos, operaciones mineras y empresas de servicios a la minería subterránea nacionales y extranjeros para, a partir de dicha información, identificar aspectos relevantes relacionados con la automatización, tanto en aspectos operacionales como de infraestructura y/o tecnología requeridos para su implementación.

La automatización tiene entre sus principales objetivos proporcionar seguridad a los trabajadores, estandarizar procesos, aumentar tiempos efectivos de trabajo y reducir costos. Además de lo anterior la tecnología presente hoy en día permitiría monitorear los equipos en tiempo real.

El mover gran cantidad de tonelaje con equipos de la envergadura que actualmente están siendo utilizados para operar en faenas mineras subterráneas (cada vez de mayor tamaño), requiere que exista una gran precisión. En consecuencia, el avance y la confiabilidad en las comunicaciones son pilares fundamentales al momento de hablar de automatización. La correcta implementación permitirá una conectividad estable y de alto rendimiento para la tecnología de automatización.

Las compañías mineras están buscando automatizar sus operaciones y que, gracias a la nueva generación de redes, se puedan intercomunicar con otros equipos y sensores aumentando la seguridad en la faena.

A pesar del potencial que ofrece esta tecnología, se debe tener presente que aún se encuentra en etapa de prueba en diferentes operaciones alrededor del mundo.

En este contexto, las tecnologías de automatización se concentran en Australia, Sudáfrica, Canadá y en menor medida países latinoamericanos, siendo una excepción Chile y las operaciones de Codelco que se encuentran a la vanguardia de la tecnología en muchos aspectos y es referente para numerosos proyectos mineros subterráneos en el mundo.

Para la elaboración de este capítulo se dividió en dos etapas claramente diferenciadas:

- Etapa 1: Recopilación de información.

Se recopiló la información disponible acerca de la utilización de sistemas semiautónomos, para equipos de carguío LHD, en distintas faenas del mundo,

considerando tanto pruebas modulares como sistemas en operación, poniendo énfasis en aspectos claves, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- **Requerimientos:** Se considera diseño, software, hardware, sensores, interferencias y mantenibilidad.
- **Rendimientos:** Considerando flota de equipos, tiempos de ciclo, ciclos por día y tiempos efectivos.
- **Seguridad y reportabilidad:** Los aspectos de seguridad consideran el área confinada, diseño, interacción con la preparación minera y estándares de operación, mientras que para la reportabilidad se consideran los ritmos de producción, niveles de automatización mejoramiento continuo y el control producción.
- **Otros:** Se menciona disponibilidad de los sistemas de automatización.

La información necesaria para abordar los puntos mencionados se obtiene a partir de catálogos oficiales de proveedores, informes y casos de estudio relacionados con automatización, congresos, visitas a terreno, entre otros.

- **Etapa 2: Análisis de aspectos relevantes.**

Se identificó, mediante un análisis de la información recolectada, los aspectos principales de la automatización en minería subterránea y se determinó los criterios generales que aplican para su utilización.

En la Figura 2-1 se muestra un esquema que resume los pasos utilizados para la confección del presente capítulo.

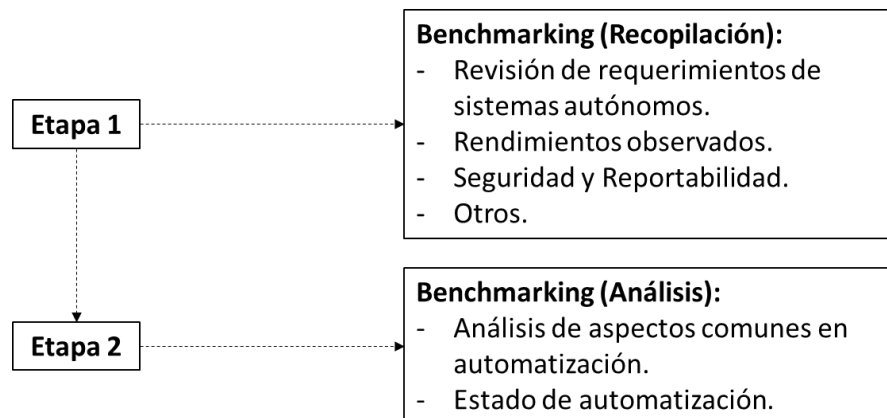


Figura 2-1: Estrategia de análisis del benchmarking

Posterior al análisis del benchmarking, este capítulo resumirá la experiencia chilena en este ámbito, centrándose en las operaciones de Codelco, en particular División El Teniente.

2.2 CONCEPTOS DE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

Para entender los conceptos que en este capítulo se compararán, se hará un resumen con las principales características de cada uno de éstos.

2.2.1 Tipo de operación de sistemas de equipos LHD

Existen cuatro tipos de operación en los equipos LHD en minería subterránea: manuales, tele-operados, tele-asistidos y autónomos (JRI, 2018). Cada uno de éstos se resume en los siguientes puntos (ver Figura 2-2):

- Operación manual:

La operación se realiza con operador a bordo, quien controla todos los movimientos y actividades del equipo, desde el carguío al punto de vaciado, además del transporte entre ambos destinos. En términos generales, la productividad suele ser más alta, pero la tasa mantenimiento aumenta por fallas humanas comunes en este tipo de operación (embates del equipo contra el cerro, sobre-exigencia del equipo en actividades puntuales, entre otros).

Este tipo de operación suele ser tener una inversión inicial menor que el resto de las opciones al no requerir inversión asociada al sistema de operación a distancia, y se utiliza mayoritariamente cuando las condiciones mineras/operacionales no revisten riesgo para las personas.

- Operación tele-operada:

Los equipos tele-operados se refieren a LHD que son controlados por un operador en un lugar remoto con el uso de cámaras, sensores y software de posicionamiento. La tele-operación permite al operador controlar el equipo desde un entorno más protegido, utilizando joysticks u otros controles de mano para controlar las funciones del equipo.

Los LHD tele-operados pueden experimentar una productividad reducida al no tener la misma sensibilidad y puntos de vista que posee el operador situado en la cabina. Sin embargo, esta operación elimina la presencia del operador en condiciones potencialmente peligrosas.

- Operación tele-asistida:

Se refiere al control parcialmente automatizado de los equipos LHD en minería subterránea. Es decir, algunas de las funciones son automatizadas y otras necesitan intervención del operador a distancia. Actualmente las funciones automatizadas más comunes incluyen transporte y vaciado, como así también sistemas que evitan las colisiones; dejando la asistencia del operador exclusivamente en el carguío de mineral desde los puntos de extracción.

Este tipo de operación permite que el operador pueda controlar más de un equipo desde la sala de control. Generalmente la proporción es 1:2 ó 1:3 (operador:equipo), dependiendo de la configuración del *layout* del nivel de producción, siendo el principal factor la distancia de acarreo. A mayor distancia de acarreo, mayor opción de operar más equipos.

Al igual que en el caso anterior, esta operación puede presentar una productividad menor que en el caso de operación manual, pero tiene la ventaja de eliminar la exposición del operador a riesgos mineros/operacionales no controlados.

- Operación autónoma:

Este tipo de operación se refiere al control autónomo de uno o más equipos LHD. Los componentes robóticos controlan todas las funciones críticas del vehículo incluyendo el encendido, la dirección, la transmisión, la aceleración, el frenado y el control del carguío y vaciado; sin necesidad de intervención del operador.

Los sistemas de minería totalmente autónomos experimentan la mayor cantidad de ganancias de productividad a medida que el software controla uno o más equipos LHD, lo que permite a los operadores asumir el papel de facilitadores o coordinadores de actividades mineras, solucionar errores y controlar la eficiencia. Asimismo, el aumento de productividad se puede observar en el aumento del tiempo efectivo de operación, ya que la operación autónoma no tiene pérdida de tiempos operacionales por cambio de turno o colación, por ejemplo.

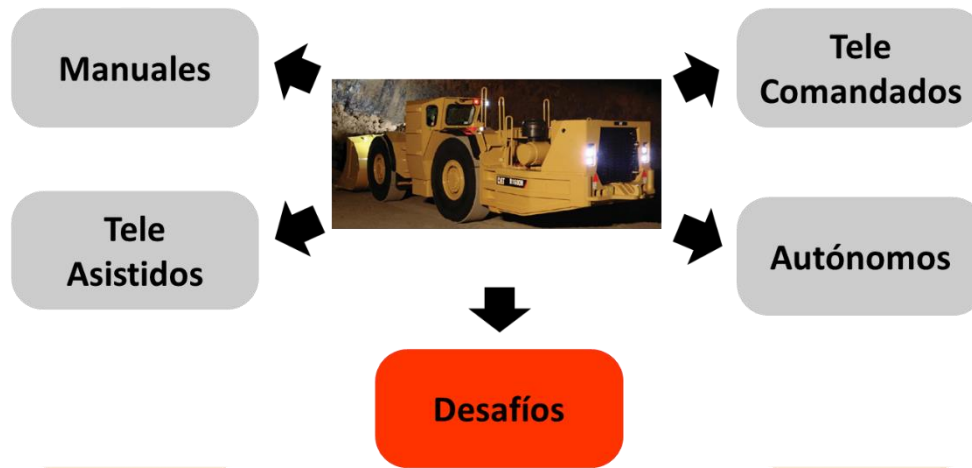


Figura 2-2: Tipo de operación de sistemas de equipos LHD

Los desafíos que se plantean a la operación autónoma dicen relación con solucionar los problemas que actualmente se visualizan en operaciones de esta índole. Los más comunes (y que tienen un alto impacto en la productividad) con sus respectivas medidas de mitigación son:

- Pérdida de red de comunicaciones: Es común que la señal de comunicaciones pierda continuidad y genere problemas en la restitución, tomando tiempo y pérdidas productivas. Para esto se ha de avanzar en asegurar que la red cumpla con los estándares requeridos.
- Mala integración del sistema de confinamiento con el sistema autónomo: La continuidad operacional se ve interrumpida por una inadecuada comunicación entre el sistema de confinamiento y el autónomo. En consecuencia, se debe definir de mejor manera el estándar operacional de ambos sistemas con el objeto asegurar el cumplimiento de los requerimientos operacionales de éstos.
- Cambio cultural: Existe una reticencia por incorporar y aceptar la automatización en los procesos productivos al verse erróneamente como una amenaza al trabajo humano. Para eliminar esto se ha de educar al personal para dar cumplimiento a requerimientos, procedimientos y deberes de la operación autónoma.

2.2.2 Requerimientos sistemas LHD autónomo

Se definen cuatro aspectos principales para utilización de sistemas LHD autónomos (JRI, 2018) que se muestran en la Figura 2-3:

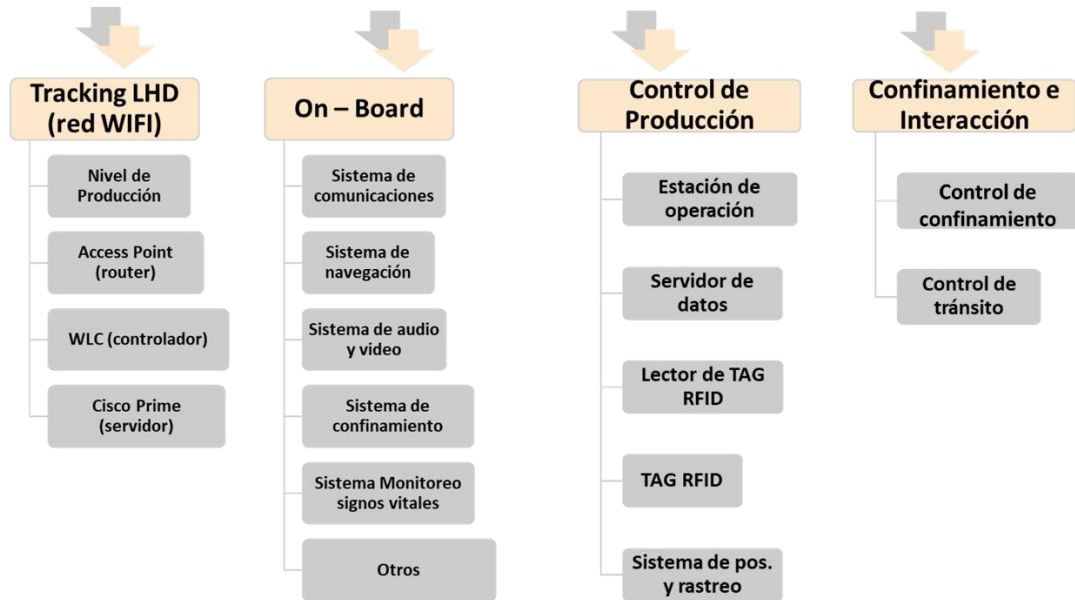


Figura 2-3: Requerimientos sistemas LHD autónomo

- Tracking LHD:

Corresponde al seguimiento y posicionamiento del equipo LHD en su circuito productivo en el nivel de producción. Para materializarlos, se requiere lo siguiente:

- Nivel de Producción: Instalación de red de comunicación WIFI.
- Access Point: Router instalado sobre la cabina del LHD. Debe poder conectarse a múltiples usuarios, auto diagnosticarse, tener alarmas y ser compatibles con red WIFI.
- WLC (controlador): Debe gestionar todas las radiofrecuencias, las políticas de seguridad, la prevención ante intrusos, permitir una autenticación centralizada y priorizar el tránsito según sea la situación.
- Servidor: Debe ser capaz de permitir la administración de redes cableadas e inalámbricas, permitir el monitoreo de las redes y permitir el acceso completo a todas las direcciones IP.

- Sistema *On Board*:

Corresponde al sistema que se implementa en el equipo LHD para controlar y monitorear su estado y funcionamiento. Se compone en:

- Sistema de comunicación: Los equipos deberán contar con antenas conectadas al módulo de comunicación con la red WIFI de la mina. La pérdida de comunicación entre el LHD y la red WIFI implicará -por temas de seguridad- una detención automática de la pala.
- Sistema de navegación: Permite procesamiento de variables y sistemas asociados para la generación de las señales de control del LHD cuando éste se encuentre en modo autónomo. Por medio del sistema de navegación también se podrá monitorear y controlar la velocidad, revoluciones por minuto, dirección, posición y carga en el balde, entre otros.
- Sistema de selección de modo de operación: El cambio entre operación manual y autónoma se realizará solo en zonas de registro habilitadas para tal efecto. El equipo debe contar con un sistema de bloqueo de seguridad a fin de activar el bloqueo del selector manual/autónomo cuando éste se encuentre en la posición de operación en modo manual.
- Sistema de audio y video: Cada LHD contará con cuatro cámaras *On Board*: dos apuntando hacia el balde, una apuntando hacia atrás del LHD y una hacia el asiento del conductor. Se debe considerar además un sistema de comunicación por voz entre la cabina y la estación de control.
- Sistema de monitoreo de signos vitales: Debe contar con un sistema de monitoreo y autodiagnóstico de sus componentes de hardware, software y firmware, que minimice el MTTR (*Medium Time To Repair* o tiempo medio de reparación) de estos sistemas. Entre las alertas relevantes se encuentran el nivel de combustible, presión y temperatura de neumáticos, aceite, estado de sensores, entre otros.
- Sistema de confinamiento: Debe ser capaz de interactuar con los distintos sistemas de segregación y apoyo a través de la red de control de forma inalámbrica.

- Sistema control producción:

Corresponde al sistema que controla y monitorea la productividad (seguimiento de dónde se extrajo mineral y dónde vació), como así también los componentes mecánicos del equipo LHD.

- Estación de operación: Las pantallas de las Estaciones de Operación deberán contar con capacidades para realizar las siguientes funciones:
 - Capacidad para cargar carta de tiraje.
 - Monitoreo, control y supervisión del sistema.
 - Monitoreo constante de variables del proceso.
 - Visualización de pantallas gráficas activas.
 - Adquisición de datos.
 - Visualización del entorno del área operacional, apoyado por el sistema CCTV de procesos.
 - Reporte de alarma del sistema.
- Servidor de datos: El servidor deberá entregar reportes con información relevante para el mantenimiento de los equipos. La información que debe entregar se debe tener al menos la siguiente:
 - Contador de fallas.
 - Tiempo transcurrido del sistema en modo local.
 - Tiempo de un equipo en mantención.
- Lector TAG RFID: El lector se encontrará montado en el LHD, el cual a medida que transite por el interior de la zona autónoma realizará la lectura de los TAG dispuestos en terreno, y transmitirá la información leída al sistema de control producción a bordo de los LHD.
- TAG RFID: Son dispositivos electrónicos que cuentan con un número único de identificación y se clasifican principalmente en activos y pasivos.
- Sistema de posicionamiento y rastreo: Entrega la detección, monitoreo y localización de los LHD que operen al interior de la zona autónoma, a fin de posicionarlo en el mapa del proyecto.

- Confinamiento e Interacción:

Corresponde al sistema que mantiene aislado el sistema autónomo de la interacción humana y equipos manuales.

- Sistema control de confinamiento (SCC): Controla que las personas y equipos manuales no ingresen al área confinada. Para lograr este objetivo, existen dos tipos de barreras que impiden esta interacción: barreras duras (puertas fijas y puertas conectadas) y barreras lógicas (sensores). Este sistema se divide de tres subsistemas:
 - Sistema de confinamiento periférico (SCCP): Delimitación flexible del área confinada (barreras duras).
 - Sistema de confinamiento operacional (SCCO): Confinamiento dinámico para la solución de problemas (barreras lógicas).
 - Zonas de registro (SCCZ): Paso de SCCP a SCCO con el fin que los LHD pasen de modo manual a autónomo (barreras duras y lógicas).

- Sistema control de tránsito (SCT): Se encargará del tránsito de personas y equipos fuera de la zona de producción. Entre las funciones específicas de este sistema se encuentran:
 - Reabastecimiento de petróleo.
 - Traslado al taller de mantenimiento.
 - Tránsito por las cabeceras.
 - Ingreso y salida de personal y equipos desde y hacia Barrio Cívico, rampas a niveles superiores e inferiores, polvorín, entre otros.Cada calle puede aislarse en tramos de modo que se puedan redefinir rutas de ingreso y salida para las personas y equipos.

2.2.3 Sistemas de navegación

Para operar de forma autónoma, los LHD requieren sistemas de navegación (JRI, 2018). Hay dos principales según se muestra en Figura 2-4:

- Navegación absoluta:
 - La navegación ocurre de acuerdo con un camino predeterminado definido por un set de coordenadas en un sistema de coordenadas.
 - El origen se define en un punto estático y no en un robot móvil.
 - Navegación y funciones de guía son dependientes de las funciones de localización en todo momento.

- El equipo al desplazarse solo se basa en su camino predefinido para evitar impactos en bordes.
 - No puede modificar camino ante obstáculos no presentes en su mapa original.
- Navegación reactiva:
- No requiere de ruta predefinida.
 - El entorno se identifica mediante sensores apropiados y se reúne la información para navegar.
 - Se identifican tres capas de softwares funcionales:
 - Nivel operacional: Acepta ajustes de velocidad y dirección del operador.
 - Nivel táctico: Controla velocidad y dirección del equipo. El operador actúa como copiloto y da sugerencias al sistema táctico para influenciar comportamiento en puntos de decisión.
 - Nivel estratégico: Interpreta la misión y genera sugerencias apropiadas al nivel táctico, el cual genera órdenes apropiadas de velocidad y dirección al sistema operacional.

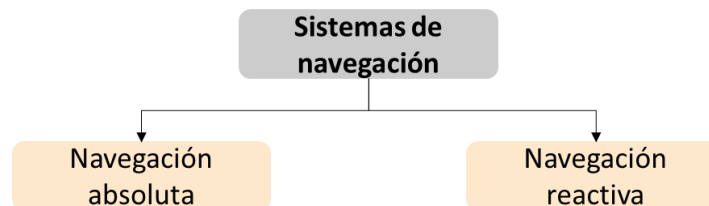


Figura 2-4: Sistemas de navegación

Los sistemas de navegación existentes para LHD autónomos utilizan láser para medir distancias o direcciones, complementando con otras tecnologías de posicionamiento. Existen distintas metodologías al respecto que se muestran en la Figura 2-5.

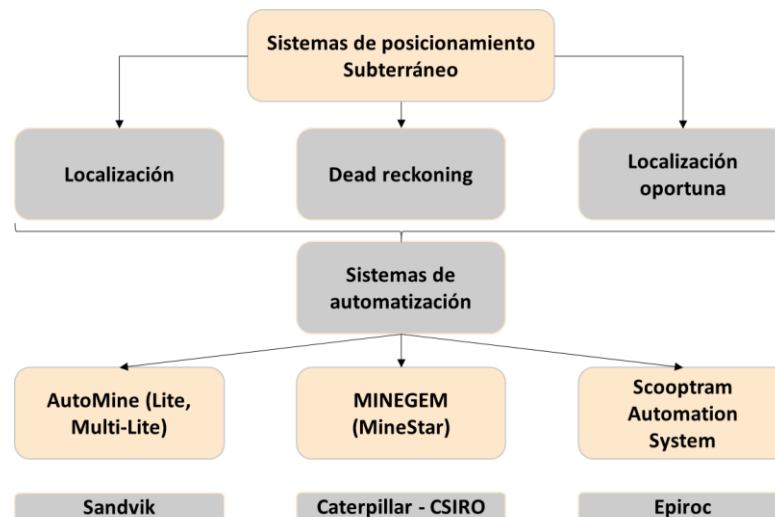


Figura 2-5: Sistemas de posicionamiento

2.2.4 Sistemas de automatización comerciales

Existen tres sistemas importantes sistemas que se comercializan actualmente para la automatización de los equipos LHD en minería subterránea (JRI, 2018), los cuales son:

- AutoMine – AutoMine Lite (Sandvik):
 - Sistema de carga y acarreo automatizado.
 - Con funciones de autoaprendizaje que permite abordar singularidades del camino y generar alertas a otros equipos.
 - Consta de diversos subsistemas:
 - Sistema control producción.
 - Sistema control misión.
 - Mine LAN – banda ancha, alta velocidad, sistema comunicación video y datos.
 - Sistema automatización a bordo.
 - Sistema de control de acceso – aislamiento y seguridad de personal.
 - Utiliza método de navegación absoluta (*Dead Reckoning* y marcadores naturales).

Nuevo sistema de posicionamiento y orientación InfraFREE en base a sensores a bordo y SCM. El detalle se puede ver en Figura 2-6.

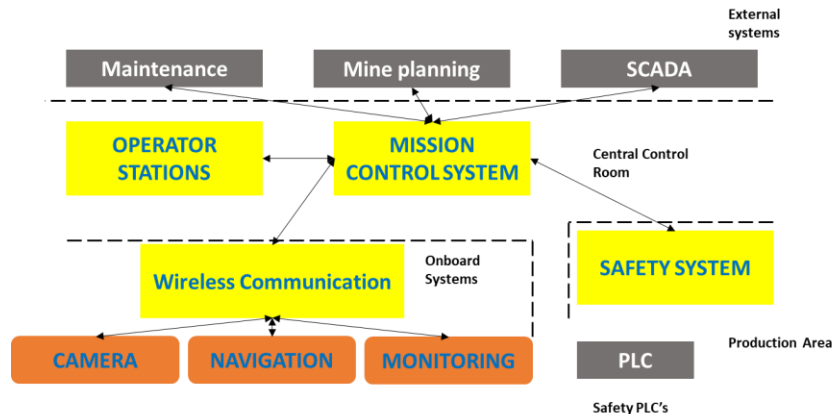


Figura 2-6: Automine System (Sandvik)

- Minegem (Caterpillar):
 - Sistema basado en navegación reactiva y localización oportuna.
 - No hay camino predefinido.
 - El sistema reacciona al entorno y decide cómo responder.
 - Puede utilizarse en modo copiloto o auto-piloto.
 - En modo copiloto el operador guía al equipo desde una sala de control por medio de joystick.
 - En modo auto-piloto el operador puede enviar al LHD a un lugar específico, el equipo llega por sistema de guía.
 - Utiliza detección láser y sistema de alcance (LADAR) para informar posición del vehículo al operador.
 - Información constantemente evaluada.
 - LADAR se ubican en parte trasera y delantera del equipo.
 - Operador puede recibir recomendaciones del equipo por sistema de audio.
 - Sistema LADAR da información al LHD comparando perfiles escaneados con perfiles existentes creados a partir del mapa de la mina.
 - El sistema puede tomar decisiones y dar comandos como avanzar, retroceder, mantener velocidad, acelerar o frenar.

El módulo de operación se puede observar en Figura 2-7.



Figura 2-7: Minegem System (Caterpillar)

- Scooptram Automation System (Epiroc):
 - Utilizado para acarreo y vaciado automatizado con sensores a bordo.
 - Vehículo recorre camino predefinido.
 - Analizado y aprobado por software administrador de ruta off-line.
 - Utiliza cámaras en parte frontal, posterior e interior de cabina.
 - Diferentes sensores incorporados.
 - Dos torres con láser.
 - Dos antenas.
 - Unidad de medida inercial.
 - Odómetro, sensores inductivos y de ángulo de desvío.
 - Sistema de comunicación WLAN.
 - En inicialización de automatización el operador conduce a través a la ruta para definir el camino.

La configuración general se muestra en Figura 2-8.

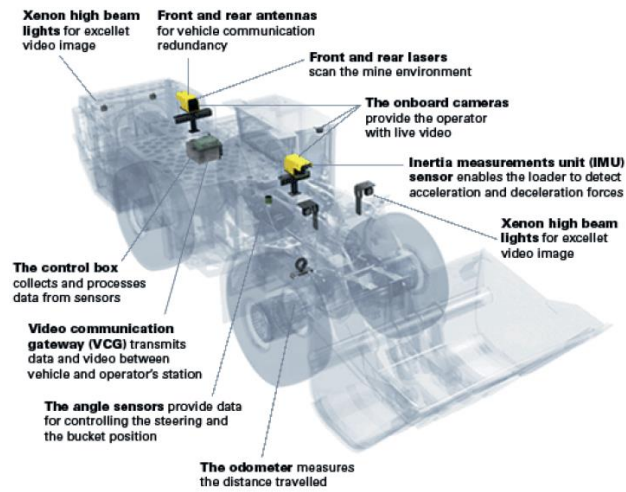


Figura 2-8: Scooptram Automation System (Epiroc)

Importante es destacar que estos sistemas, en general son cerrados, y no permiten el manejo de información desde su base de datos por encontrarse encriptados. Por lo tanto, la decisión de optar por uno de estos sistemas deberá ser tomada luego de una evaluación técnico-económica.

2.3 BENCHMARKING FAENAS MINERAS EN EL MUNDO

La recopilación de información abarcó diferentes tecnologías que conforman la automatización de los equipos LHD, en donde se identifican los aspectos propios de cada uno de éstas, incluyéndose las características principales dispuestas por los proveedores y faenas donde se han realizado pruebas con equipos semiautónomos (BCTEC, 2019).

Para concretar los cuadros comparativos se incluyeron faenas de Northparkes (Rio Tinto, Australia), Olympic Dam (BHP Billiton, Australia), Cadia East (Newcrest, Australia), Kirunawara (LKAB, Suecia) y Malmberget (LKAB, Suecia). También se ha incluido información de los proyectos Andes Norte (Proyecto Nuevo Nivel Mina, PNNM) de DET y el Proyecto Chuquicamata Subterránea (PMCHS).

Los cuadros comparativos abarcaron las áreas de los requerimientos, rendimientos, y seguridad y reportabilidad.

Para realizar la comparación antes señalada se hará una breve descripción de las operaciones mineras incluidas en este benchmarking para tener una mejor conceptualización de lo que se está comparando.

2.3.1 Descripción operaciones mineras

- Northparkes:

Pertenece a CMOC (Chine Molybdenum Co. Ltd) en un 80% y Suminoto Groups en un 20%. Se ubica en Australia (New South Wales) y su método de explotación es Block Caving. Se reconoce como la mina subterránea más automatizada del mundo. En 2015 uno de sus lifts (E48 Lift 1) inició producción con 100% de sus palas autónomas (solo asistencia en el carguío), teniendo una relación de 1 operador por 3 equipos LHD.

El *layout* corresponde a una malla Herringbone (Figura 2-9) con vaciado en una tolva ubicada fuera del *footprint* productivo. Su producción es del orden de los 7 Mtpa.

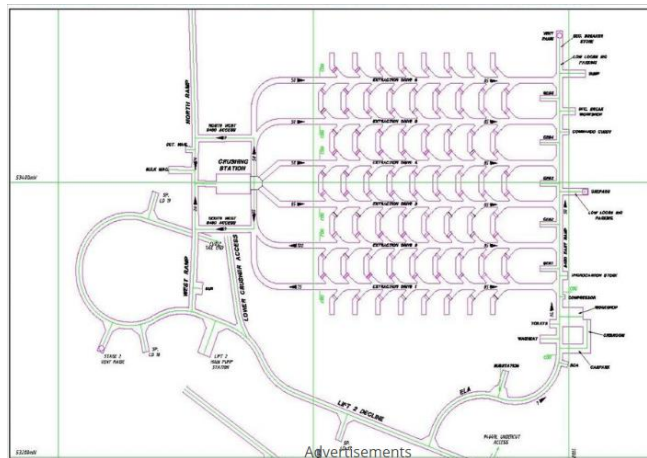


Figura 2-9: *Layout* nivel de producción de Northparkes

- Olympic Dam:

Pertenece a BHP Billiton. Se ubica en Australia (South Australia) y su método de explotación es Sublevel Open Stopping (Figura 2-10).

Las palas toman el mineral desde los puntos de extracción y los vacían en piques de traspaso ubicados en la periferia del *layout*, y alimentan un sistema de ferrocarril que transporta el mineral a planta. Su producción es del orden de 10 Mtpa.

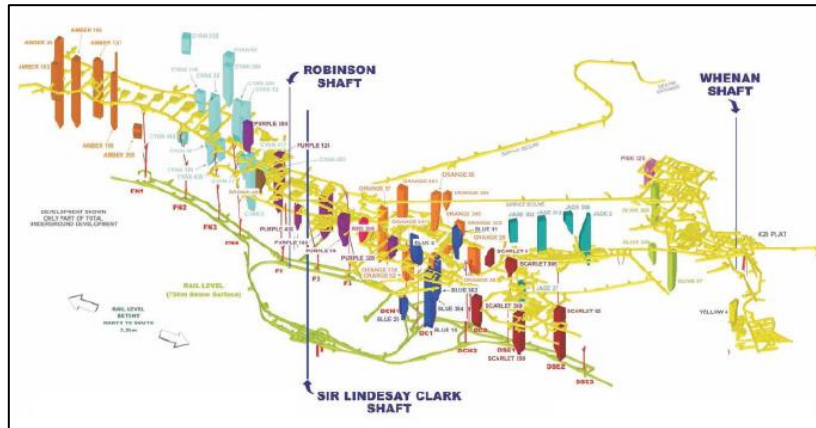


Figura 2-10: *Layout* nivel de producción de Olympic Dam

- Cadia East:

Pertenece a Newcrest Mining. Se ubica en Australia (New South Wales) y su método de explotación es Block Caving.

El *layout* corresponde a una malla Teniente (Figura 2-11), vaciando a chancadores ubicados en la periferia del nivel de producción. La producción asciende al orden de los 27 Mtpa desde diferentes lifts.

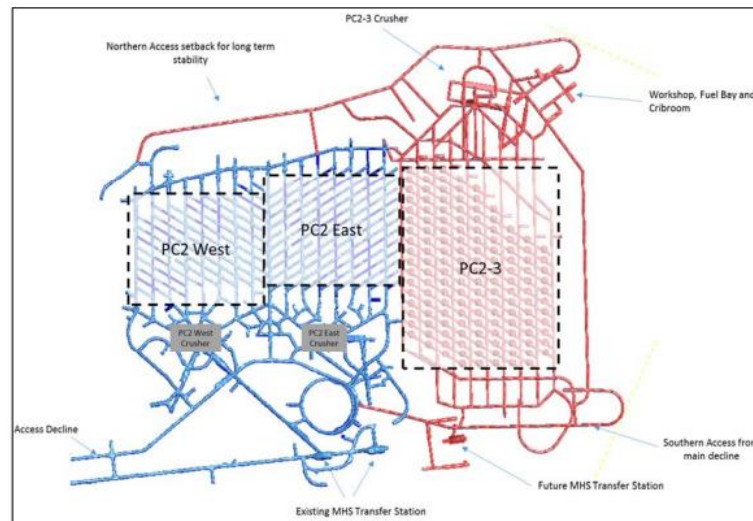


Figura 2-11: *Layout* nivel de producción de Cadia East

- Kiruna y Malmberget:

Ambas minas pertenecen a LKAB y se ubican en Suecia (Norrbotten). El sistema de explotación corresponde a un Sub Level Caving. Tiene un alto grado de automatización en sus procesos (pilas, martillos y tren), con un centro de operaciones ubicado en el exterior de la mina, en superficie.

Kiruna es la mina subterránea de hierro más grande del mundo.

El *layout* (Figura 2-12) da cuenta de un vaciado en la periferia del nivel de producción que comunica con el nivel de transporte principal que corresponde a un ferrocarril. La producción alcanza 26 y 17 Mtpa para Kiruna y Malmberget, respectivamente.

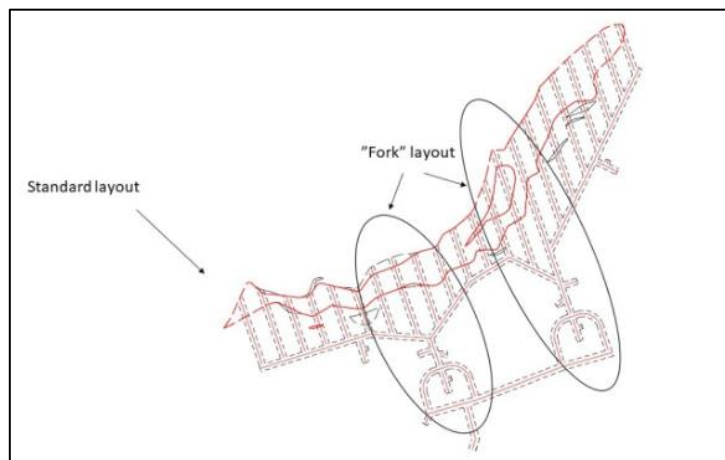


Figura 2-12: *Layout* nivel de producción de Kiruna y Malmberget

- Proyecto Andes Norte (Proyecto Nuevo Nivel Mina, PNNM):

Pertenece a Codelco (División El Teniente). Se ubica en la zona central de Chile (Región de O'Higgins). Este proyecto tiene un sistema de explotación que corresponde a un Panel Caving. Tendrá un alto grado de automatización con una sala de operaciones ubicada en la ciudad de Rancagua (60 km de distancia, aproximadamente).

El *layout* corresponde a una malla Teniente (Figura 2-13), con piques de vaciado en el interior del *footprint* y que comunican con un nivel inferior de transporte de camiones. Se tiene proyectado que la producción para Andes Norte alcanzará 12,6 Mtpa.

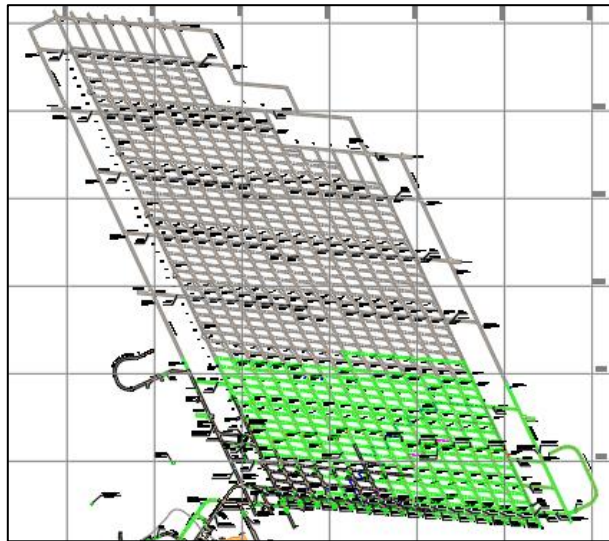


Figura 2-13: Layout nivel de producción Proyecto Andes Norte

- Proyecto Chuquicamata Subterránea (PMCHS):

Pertenece a Codelco (División Chuquicamata). Se ubica en la zona norte de Chile (Región de Antofagasta). Su sistema de explotación será un Panel Caving, con alto grado de automatización.

El *layout* corresponde a una malla Teniente (Figura 2-14), con vaciado en chancadores ubicados en la periferia del nivel de producción. La producción alcanzará 45 Mtpa.

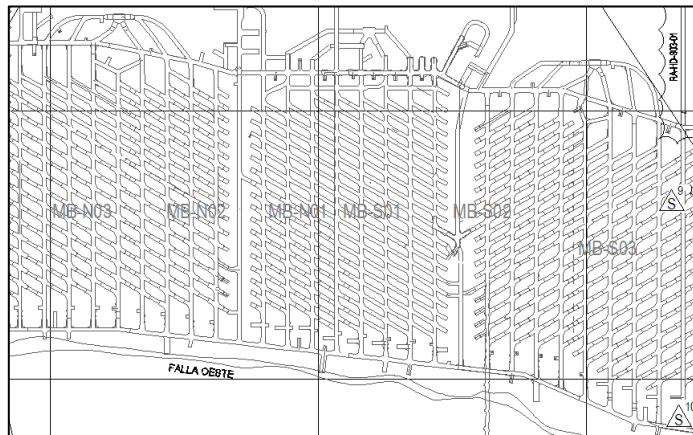


Figura 2-14: Layout nivel de producción Proyecto Chuquicamata Subterráneo

2.3.2 Requerimientos

Respecto a los requerimientos que el sistema de automatización de los equipos LHD necesitan para concretar su operación y que se pudo identificar en esta investigación, se consideró aspectos relacionados con el diseño, software, sensores, hardware, infraestructura y mantenibilidad (BCTEC, 2019).

Cada uno de estos puntos presenta diferencias importantes dependiendo de la realidad de cada operación, y se identificaron como los más relevantes para generar un cuadro comparativo y sencillo para generar una propuesta que sea trazable y aplicable a futuros proyectos. Así por ejemplo, la ubicación de los puntos de vaciado (como parte del ítem diseño) genera supuestos distintos si se trata de tolvas periféricas o puntos de vaciado en el interior del *footprint*. El primero tendrá en consideración la habilitación de todos los accesos para vaciar, mientras el segundo tendrá en cuenta un área mínima que abarque un punto de vaciado (comúnmente la calle completa).

Las Tabla 2-1, Tabla 2-2 y Tabla 2-3 resumen los requerimientos para el correcto funcionamiento de las faenas que poseen sistemas de extracción LHD semiautónoma (SA).

Tabla 2-1: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (1 de 3)

| Aspectos específicos | Northparks Bloque E48 (CMOC) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | PNNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Diseño | Acceso a tolva debe estar 100% realizado. Tolvas en los extremos del <i>footprint</i> . | - | - | Necesidad de frontones de inversión adicionales, asociado a la instalación de barreras duras. | Necesidad de sistema de traspaso operativo y exclusivo entre el nivel producción y transporte intermedio. | Calle incorporada en su totalidad antes de automatizar. | Realización de desquiches en calles para doble ruta. |
| Software | AutoMine. | AutoMine Lite. | MINEGEM. | MINEGEM. | Minestar. | AutoMine y MINEGEM. | Scooptram Automation System. |
| Sensores | Ubicados a bordo del equipo (miden proximidad y detectan barreras lógicas). | Sistema de registro de posición a bordo en base sistema coordinado. | Detección láser y sistema de alcance (LADAR) para informar posición del vehículo. | Miden proximidad y detectan barreras lógicas. | Detección de barreras automáticas y lógicas. | Detección de barreras automáticas y lógicas. | Sensores asociados a las barreras lógicas y proximidad a galería (cajas). |

Tabla 2-2: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (2 de 3)

| Aspectos específicos | Northparkes Bloque E48 (CMOC) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | NNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|------------------------|--|---|--|--|---|---|--|
| Hardware | <ul style="list-style-type: none"> - Pantalla táctica. - Pantalla estratégica. - Pantalla común (cámaras a bordo). - Joystick. - Teclados. - Mouse. <p>La conexión es alámbrica entre gabinetes y los Minibox (repetidores) y es inalámbrica entre Minibox, Access Points y barreras lógicas.</p> <p>No se dispone información acerca del uso de reproductor/receptor de sonido.</p> | | <ul style="list-style-type: none"> - Pantallas interactivas (GOIC). - Joystick. - Teclados. - Mouse. - Cámaras. - Reproductor de audio (tipo feedback). <p>Conexiones por fibra óptica (100 Mbps) y red inalámbrica (11 Mbps) a barreras lógicas.</p> <p>Computador a bordo (PC104). Estatus del vehículo.</p> | | - | - | <p>Pantalla con imagen de detección láser y signos vitales.</p> <p>Pantalla con el rendimiento del equipo y tonelaje requerido por turno.</p> <p>Tiene opción de joysticks en mesa o en asiento, para comodidad del operador remoto.</p> <p>Cámaras.</p> |
| Infraestructura | <p>Sala de operación para el control remoto y una zona de registro.</p> <p>Se necesitan espacios adicionales para la instalación de servicios de conexión alámbrica e inalámbrica.</p> | Sala externa para asistencia remota de equipos. | Sala externa para asistencia remota de equipos. | <p>Se necesita sala de operación para el control remoto y una zona de registro.</p> <p>Se necesitan espacios adicionales para la instalación de servicios de conexión alámbrica e inalámbrica.</p> | <p>Se necesita zona de registro.</p> <p>Se requiere sala telecomando (interior mina y CIO).</p> | <p>Se necesita zona de registro.</p> <p>Se requiere sala telecomando.</p> | <p>Se necesita zona de registro.</p> <p>Se requiere sala de monitoreo.</p> |

Tabla 2-3: Requerimientos para el funcionamiento de equipos LHD SA (3 de 3)

| Aspectos específicos | Northparkes Bloque E48 (CMOC) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | NNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|-----------------------|---|--------------------------------|--|--|--|--|---|
| Mantenibilidad | <p>Mantiene plan matriz de equipo manual</p> <p>Requiere tiempo adicional para revisión de elementos que permiten el funcionamiento del sistema autónomo.</p> | - | <p>Menor cantidad de mantenencias requeridas.</p> <p>Mayor vida útil de neumáticos y componentes externos.</p> | <p>Disminuyen las tasas de falla y horas de mantención del plan matriz</p> | <p>Revisión previa a la entrada al área autónoma, en zona delimitada para mantención</p> | <p>Revisión previa a la entrada al área autónoma, en zona delimitada para mantención</p> | <p>Revisión previa a la entrada a la zona confinada</p> |

La revisión de los requerimientos para la minería subterránea autónoma indica que, en términos de infraestructura, se utiliza una sala de control y operaciones, ya sea interior

mina o en otra zona externa, para el monitoreo de la producción y el estado de funcionamiento de los equipos, así como también para entregar asistencia remota o en período de comisionamiento.

En cuanto al diseño general, para la operación autónoma de los equipos LHD se configuran módulos confinados que aíslan al equipo en una zona productiva asignada específicamente y que contiene los elementos necesarios para su operación, incluyendo su respectivo punto de vaciado. El confinamiento se realiza mediante barreras duras, móviles y sensores, y se delimita mediante zonas de registro para entrada y salida de las zonas de confinamiento.

Entre los principales softwares presentes en las pruebas y operaciones autónomas revisadas destacan la presencia de AutoMine, MineGem, y Minestar, con sus respectivas variantes. Entre sus aplicaciones y funciones incorporan una serie de instrumentos de control como sensores a bordo de los equipos para triangular posición y detectar entorno, cámaras, pantallas y otros aparatos orientados al monitoreo del equipo y su funcionamiento.

Finalmente, desde el punto de la mantenibilidad, existe consenso que la operación autónoma requiere y exige respetar la frecuencia de mantención preventiva (y potencialmente aumenta su tasa), pero, al mismo tiempo, la tasa de fallas disminuye y aumenta la vida útil de neumáticos y componentes externos.

2.3.3 Rendimientos

Los resultados de rendimientos observados en la operación de equipos autónomos para las minas estudiadas se resumen en la Tabla 2-4, presentándose información adicional según la disponibilidad y acceso que se tuvo a ésta (BCTEC, 2019).

Tabla 2-4: Rendimientos observados de LHD SA

| Aspectos específicos | Northparkes (Bloque E48) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) predominate Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | NNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|------------------------|---|--------------------------------|--|---|--|--|---|
| Flota de equipos | 8 LHD | 11 LHD | 13 LHD | 14 LHD | 16 LHD | 32 LHD | 6 LHD (2 – 3 equipos en pruebas SA) |
| Tiempos de ciclo (min) | 0,9 (440 m promedio) | - | - | 3,8 (600 m promedio) | 2,8 (35 m promedio) | 2,0 (310 m promedio) | 1,7 (268 m promedio) |
| Ciclos por día | 1.600 | - | - | 256 | - | 560 | 635 |
| Tiempo efectivo (hr) | 22 | 20 | 22 | 16 | 17 | 19 | 18 |
| Equipos | LHD Sandvik 450E eléctricos 12 t | LHD Tamrock Toro 2500 | LHD R2900G Caterpillar 25 t | LHD R2900 Caterpillar 20 t | Epiroc o Sandvik LHD 14 t | LHD 19 ó 23 t Sandvik LHD 19 ó 23 t Caterpillar | LHD ST14, 13 t |
| Curva de aprendizaje | Se hicieron pruebas en 2002, y entre 2005 y 2006. | - | - | - | - | - | Al comienzo de la operación autónoma, el tiempo de ciclo fue 2,3 min, para luego pasar a 1,7 min. Aumento de productividad de 44 Kt a 133 Kt. |

En cuanto a los rendimientos observados en las operaciones autónomas investigadas se encuentran tiempos de ciclo de entre 0,9 y 3,7 min, alcanzando hasta 1.600 ciclos por día, para distancias medias de acarreo de 400 m, como lo es en el caso de Northparkes.

El tiempo de hora efectivo por día se encuentra entre 16 a 22 horas.

2.3.4 Seguridad y reportabilidad

La Tabla 2-5 y Tabla 2-6 resumen los aspectos de seguridad y reportabilidad de los sistemas autónomos estudiados (BCTEC, 2019).

Tabla 2-5: Seguridad y reportabilidad de equipos LHD SA (1 de 2)

| Aspectos específicos | Northparkes (Bloque E48) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) predominate Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | NNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|---|--|---|---|--|--|--|---|
| Área confinada | Delimitada por barreras automáticas (para las personas) y barreras lógicas (para los LHD). | - | - | Está delimitada por barreras duras y lógicas. | Tapados temporales y barreras lógicas. | Portones con sensores hacia tolvas. | Sólo barreras lógicas. |
| Diseño | Se necesita una Zona de Registro. | - | - | Se necesita una Zona de Registro. | Se necesita zona de registro y tapados temporales. | Se necesita una zona de registro. | Se necesita zona de Registro. Requiere de un sistema de reconocimiento de objetos, para diferenciar equipos, personas y elementos fijos (paredes). |
| Interacción con preparación minera | No convive con preparación. | - | - | No convive con preparación el método de explotación. | Conviven desarrollos y construcción con producción. | No convive con preparación. | No convive con preparación. |
| Estándares operación. | Menor requerimiento de ventilación. 1 LHD por calle. Carpeta en óptimas condiciones. Automatización en zona confinada con barreras duras. | Menor requerimiento de ventilación. 1 LHD por calle. Automatización en zona confinada con barreras duras. | Menor requerimiento de ventilación. 1 LHD por calle. Automatización en zona confinada con barreras duras. | Se utilizan estándares europeos y australianos: EN954-1 y AS4024-1 | Más de un LHD por calle en régimen. Ventilación por criterio del fabricante. Carpeta hormigón. Mitigación polvo con agua para mejorar visualización. | 1 LHD por calle. Automatización en zona confinada con barreras duras. Estándares de señal inalámbrica. | - Menor requerimiento de ventilación. Más de 1 LHD por calle. Automatización en zona confinada por barrera lógica. |

Tabla 2-6: Seguridad y reportabilidad de equipos LHD SA. (2 de 2)

| Aspectos específicos | Northparkes (Bloque E48) Block Caving | Kiruna (LKAB) Sub Level Caving | Malmberget (LKAB) predominate Sub Level Caving | Olympic Dam (BHP Billiton) Sublevel Open Stopping con relleno | NNM Andes Norte (Codelco) Panel Caving | PMCHS (Codelco) Block Caving | Cadia East (Newcrest) Block Caving |
|---|---|--|--|--|--|------------------------------|--|
| Ritmo de extracción (Mtpa) | 7 | 26 | 17 | 10 | 12.6 | 45 | 27 |
| Nivel de automatización del layout | 100% | (Prueba) | (Prueba) | - | (Proyecto) | (Proyecto) | 33% |
| Mejoramiento continuo | Cambio en el llenado de factor de balde. Aumento en frecuencia de limpieza de calle. Aumento de barreras duras y lógicas. | - | - | - | (Proyecto) | - | Adaptación de Sub Level Stopping a Block Caving. Cambio de red de WIFI a comunicaciones a 5g LTE. Sistema abierto que permite interoperatividad y reconocimiento de otros equipos. |
| Control de producción | Reportes en línea, estatus de pala, ubicación, sensores de signos vitales. | Reportes en línea, estatus de pala, ubicación, sensores de signos vitales. | Reportes en línea, estatus de pala, ubicación, sensores de signos vitales. | Reportes en línea, estatus de pala, ubicación, sensores de signos vitales. | Licitado | Licitado | Reportes en línea, estatus de pala, ubicación, sensores de signos vitales. |
| Softwares ya están disponibles en el mercado. | | | | | | | Software en prueba en Cadia East, Newcrest Mining. |

Los aspectos seguridad y reportabilidad indican la necesidad de portones y barreras móviles en áreas confinadas que permitan separar la operación de otras labores auxiliares, incluyendo además zonas de registro de equipos. Los estándares de operación indican que disminuyen los requerimientos de ventilación debido a la ausencia de personal en la mina, mientras que se debe asegurar tanto la calidad de las carpetas de rodado como del confinamiento de los equipos. Los sistemas de control producción (propios de cada sistema de automatización) permiten la generación de reportes en línea del estado de la producción, signos vitales de los equipos y ubicación del equipo y sus componentes.

No se hace mención de interacción con labores de preparación minera.

2.4 EXPERIENCIA EN CODELCO

Codelco inició el proceso de automatización en palas de producción en los proyectos mineros Pipa Norte y Diablo Regimiento, en el año 2004. Ambos consideraron una modalidad semi-asistida, esto es que un operador puede controlar simultáneamente tres equipos y se encarga del carguío en el punto de extracción. El transporte y descarga de la pala es realizado automáticamente por un sistema (Automine, Sandvik), que toma control de los equipos hasta dejarlos de nuevo en condición de carguío frente al punto de extracción.

Las ingenierías básicas de ambos proyectos (desarrolladas durante el año 2001) contemplaron que para cada 10.000 tpd se necesitarían 3 LHD. Hubo simulaciones de respaldo cuyos supuestos se hicieron sobre la base de mejoras que el sistema de LHD semiautomáticos alcanzaría respecto a un esquema con LHD con operador a bordo, tomando en cuenta la disponibilidad, utilización, rendimiento, costo y productividad (SKM, 2001).

Sin embargo, un informe de post evaluación (Codelco, 2007) realizado a 3 años de iniciadas las operaciones de estas minas mostró desviaciones respecto a las consideraciones hechas. Las principales razones de estas brechas fueron:

- Gestión de mantenimiento no apropiada para la tecnología, lo que incidió en la disponibilidad y el costo de mantención y reparación (M&R).
- Subestimación en la ingeniería básica de los costos de M&R del sistema Automine, automatización a bordo de los cargadores, hardware en terreno y servidores.
- Subestimación de las interferencias operacionales asociadas a las actividades de apoyo, lo que incidió negativamente en la utilización.
- Velocidad de los equipos sobreestimada, lo que impactó en el rendimiento de las palas.
- Subestimación de dotaciones, al no considerar operador por turno para apoyo del sistema en terreno.

Finalmente, la automatización tuvo un resultado dispar en estos inicios en Codelco. En el caso del Pipa Norte se decidió agregar más palas y continuar con el proceso de mejora y maduración de la tecnología de automatización. En el caso del Diablo Regimiento, se optó por postergar la aplicación de esta tecnología.

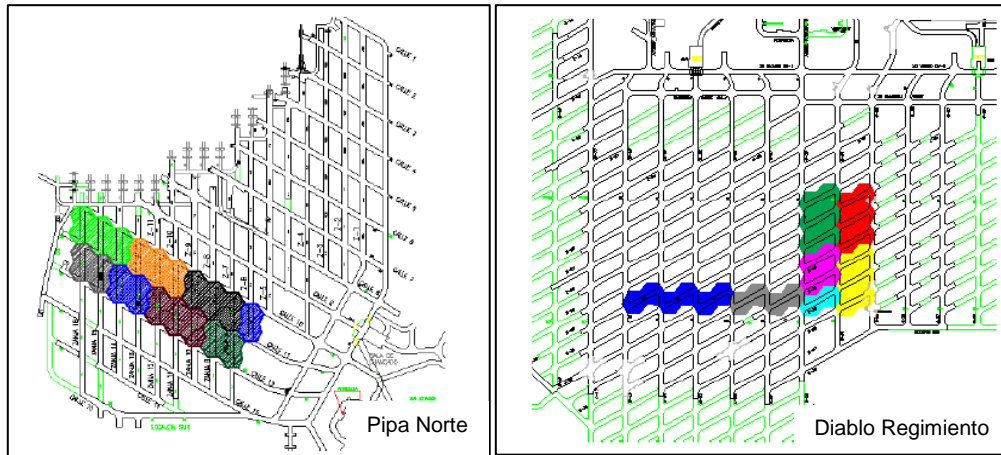


Figura 2-15: Layout nivel de producción Pipa Norte y Diablo Regimiento

El *layout* (Figura 2-15) en ambas minas es bastante similar es su esencia: malla Teniente con vaciado en chancador ubicado en la periferia de la zona productiva. Si bien es cierto este diseño se observa en otras minas en el mundo con automatización exitosamente implementada (Capítulo 2.3), lo que perjudicó la continuidad y expectativas que tenían sobre este sistema en las minas Pipa Norte y Diablo Regimiento fue un importante desconocimiento de esta tecnología previa a su estimación e implementación, y los indicadores comprometidos que no se lograron alcanzar.

Por otro lado, a partir de fines del año 2017 se dio inicio de las pruebas SAT (*Site Acceptance Test*) para la validación de los LHD semiautónomo nivel Alpha (pruebas de rigor para el prototipo antes de pasar a versión comercial, y que debe dar cumplimiento a las expectativas planteadas) en mina Esmeralda, la cual consistió en una operación semi-asistida (el operador solo interviene en el carguío) con un sistema desarrollado por Finning-Caterpillar (Codelco, 2019).

La solución tecnológica Alpha responde a un requerimiento de innovación incremental para Codelco, cuyo objetivo es generar un estándar para la automatización de los LHD para una operación completamente automatizada en los proyectos estructurales y desarrollo de la Corporación.

La operación de la prueba industrial contempló la automatización de dos LHD que operaron en 3 calles en un *layout* con malla tipo Teniente (Figura 2-16), cada una con un punto de vaciado, y segregado por barreras físicas y lógicas. La operación se realizó desde la sala CIO (Centro Integrado de Operación) en Rancagua y desde el Barrio Cívico de mina Esmeralda. El período de tiempo considerado para la prueba fue de un año. Los resultados validaron la tecnología, cumpliendo con éxito la aprobación de las funcionalidades Alphas y los KPI's comprometidos en el protocolo de prueba con el proveedor.

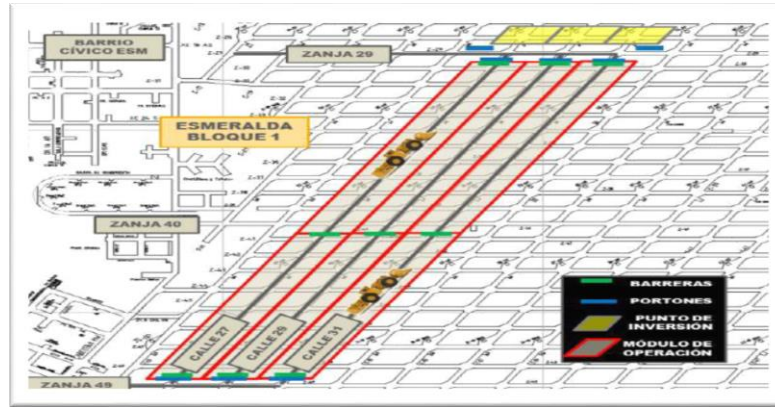


Figura 2-16: Layout nivel de producción prueba Alpha en mina Esmeralda

Los resultados globales obtenidos se resumen en los siguientes puntos:

- Mejora las condiciones de seguridad y salud ocupacional de la operación. La tecnología demostró que su operación es segura, permitiendo retirar a los operadores de zonas de riesgo. Mejora en forma significativa la ergonomía y condiciones de salud de los operadores al eliminar la exposición a la vibración, polvo y ruido del terreno.
- Permite controlar la planificación con una extracción uniforme de la carta de tiraje. Esto es relevante para los puntos limitados y/o en zonas de riesgos.
- El sistema permite una mejora de la productividad global al habilitar:
 - La operación de dos equipos por calle.
 - La operación en módulos, con accesos independientes, da mayor flexibilidad.
 - La operación de dos o más equipos por operador contribuye en mejorar las dotaciones y costos.
 - Información y reportabilidad web configurable en tiempo real.
 - Aumentan los tiempos efectivos por turno (5-6 horas).
 - La disponibilidad de los equipos con todo el sistema de automatización superó las expectativas (cercano al 85%).

2.5 RESUMEN BENCHMARKING FAENAS MINERAS EN EL MUNDO

En la industria, existe clara evidencia de extracción con palas autónoma en minería subterránea -como se puede observar en la Tabla 2-7-, debido principalmente a los beneficios que ésta podría traer a la operación en términos de costos, rendimientos y seguridad, entre otros. Sin embargo, su correcta implementación está sujeta a una serie de condiciones tanto tecnológicas, como de diseño y operativas. Por esta razón, el presente análisis comparativo recopila los principales aspectos de los sistemas de extracción autónoma que se utilizan o han utilizado en la industria minera en el mundo (BCTEC, 2019).

Tabla 2-7: Antecedentes de utilización de sistemas autónomos en minería subterránea

| Compañía | Mina | País | Uso | Fabricante | Sistema automatización | LHD/Camión |
|--------------------|------------------------|-----------|------------------------|-------------|------------------------|------------|
| Teck/Barrick Gold | Williams | Canadá | Presente | Sandvik | AutoMine | LHD |
| BHP Billiton | Olympic Dam | Australia | Presente | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| Boliden Mineral AB | Garpenberg | Suecia | Presente, fase inicial | Sandvik | AutoMine Lite | LHD |
| Codelco | DET, DR | Chile | No en uso | Sandvik | AutoMine | LHD |
| Codelco | DET, Pipa Norte | Chile | No en uso | Sandvik | AutoMine | LHD |
| Codelco | DET, Esmeralda (Alpha) | Chile | No en uso | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| DeBeers CM | Finsch | Sudáfrica | Presente | Sandvik | AutoMine | Camión |
| VALE INCO | Creighton | Canadá | Hasta 2003 | - | Light wise GS | LHD |
| Inmet | Pyhäsalmi | Finlandia | Presente | Sandvik | AutoMine Lite | LHD |
| LKAB | Kiruna | Suecia | - | Sandvik | AutoMine Lite | LHD |
| LKAB | Malmberget | Suecia | Prueba | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| Newmont Mining C. | Jundee | Australia | Presente | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| Northgate M Co | Stawell Gold | Australia | - | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| Rio Tinto | Northparkes | Australia | Operación | Caterpillar | MINEGEM | LHD |
| Rio Tinto | Diavik | Canadá | 2010 | Atlas Copco | Scooptram Autom. | LHD |
| XSTRATA | Mt Isa | Australia | - | Sandvik | AutoMine | LHD |
| Newcrest | Cadia East | Australia | Prueba | Epiroc | Scooptram Autom. | LHD |

Para dar respuesta al punto mencionado anteriormente, se realizó una búsqueda y análisis de información de las principales faenas en el mundo que han incorporado a su

operación o han realizado pruebas con equipos LHD semiautónomos, en donde se describen aspectos como requerimientos operacionales y de infraestructura, y sus principales características.

El resultado del análisis comparativo realizado a la automatización de equipos LHD en minería subterránea, se puede resumir en los siguientes puntos:

- La revisión de los requerimientos para la minería subterránea autónoma indica que, en términos de infraestructura, se utiliza una sala de control y operaciones ya sea interior mina o en otra zona externa para el monitoreo de la producción y el estado de funcionamiento de los equipos, así como también para entregar asistencia remota en caso de ser requerida o apoyo en el período de comisionamiento.
- En cuanto al diseño general para la operación autónoma de los equipos LHD, se configuran módulos confinados que aíslan al equipo en una zona productiva asignada específicamente para éste y que contiene los elementos necesarios para su operación, incluyendo su respectivo punto de vaciado. El confinamiento se realiza mediante barreras duras, móviles y sensores y se delimita mediante zonas de registro para entrada y salida de las zonas de confinamiento.
- Entre los principales softwares presentes en las pruebas y operaciones autónomas revisadas destacan la presencia de AutoMine y MineGem, con sus respectivas variantes. Entre sus aplicaciones y funciones incorporan una serie de instrumentos de control como sensores a bordo de los equipos para triangular posición y detectar entorno, cámaras, pantallas y otros aparatos orientados al monitoreo del equipo y su funcionamiento.
- En cuanto a los rendimientos observados en las operaciones autónomas investigadas, se encuentran tiempos de ciclo de entre 1 y 3,7 min, alcanzando hasta 1.600 ciclos por día, para distancias medias de acarreo de 400 m, como lo es en el caso de Northparkes. El tiempo de hora efectivo por día se encuentra entre 16 a 22 horas.
- Los aspectos seguridad y reportabilidad indican la necesidad de portones y barreras móviles en áreas confinadas que permitan separar la operación de otras labores auxiliares, incluyendo además zonas de registro de equipos. Los estándares de operación indican que disminuyen los requerimientos de ventilación debido a la ausencia de personal en la mina, mientras que se debe asegurar tanto la calidad de las carpetas de rodado como del confinamiento de los equipos. Los sistemas de control producción (propios de cada sistema de automatización) permiten la generación de reportes en línea del estado de la producción, signos vitales de los equipos y ubicación del equipo y sus componentes.

- La información obtenida en el benchmarking no hace alusión a posibles interferencias entre producción y preparación minera debido a que las pruebas se han realizado en módulos previamente construidos o en operaciones preexistentes.
- El conocimiento actual de esta tecnología ha alcanzado una madurez que permite ser considerada e implementada en los futuros proyectos de las grandes mineras del mundo.
- Las nuevas pruebas han permitido abrir opciones y alternativas que antes no eran prácticas comunes, como por ejemplo tener dos palas produciendo en la misma calle.

3 CAPÍTULO III: CRITERIOS DE DISEÑO PARA PALAS AUTÓNOMAS Y DEFINICIÓN MÓDULO INICIAL DE OPERACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta criterios de operación apropiado y adaptado a las condiciones de minería subterránea para la automatización de los equipos LHD, considerando la información recopilada en el capítulo anterior y su aplicabilidad a una mina con método de explotación tipo Panel Caving. Se establece una línea base de los criterios o fundamentos técnicos y operacionales para el diseño de la automatización de equipos LHD en minería de caving, en particular la autonomía de éstos.

Asimismo, se dan las directrices para definir un módulo inicial de operación que permita implementar la automatización bajo ciertos criterios técnicos y operacionales de tal forma de concretarla tempranamente en minas que se encuentren en desarrollo, permitiendo una convivencia segura entre la construcción y la operación autónoma aislada de equipos LHD.

En términos generales y como ya se mencionó en el capítulo anterior, los equipos LHD actualmente tienen la opción de operar en cuatro (4) modos o formas diferentes, y que son: manual, tele-operado, tele-asistido y autónomo. Sin embargo, para materializar la autonomía de los equipos LHD y que es el objetivo de esta tesis, es imprescindible pasar o apoyarse por algunos o todos los modos descritos para materializar y asegurar la puesta en marcha del sistema autónomo. En este sentido cada modo debiese apoyar y ayudar de la siguiente forma (JRI, 2018):

- Manual:

El equipo es operado por una persona en forma directa a bordo del LHD. Este modo de operación se utiliza para proceso de carga de combustible y procesos de mantenimiento del LHD, durante la puesta en marcha y período de entrenamiento, posteriormente la operación será normalmente en modo autónomo.

- Tele-operado:

El equipo es operado a distancia mediante controles apropiados (joysticks) y una red de comunicaciones. El operador debe tener acceso a imágenes de cámaras sobre el equipo e información de las variables internas relevantes (niveles, velocidades, etc.)

- Tele-asistido:

Adicional a la tele-operación, el sistema cuenta con alguna capacidad de asistencia para facilitar el trabajo del operador, la cual puede ser desde detección de condiciones especiales hasta navegación cuasi-autónoma, pero utilizando los comandos del operador como referencia. Este modo de operación se utilizará para labores de carguío de los LHD dentro de la zona de extracción.

- Autónomo:

El equipo puede realizar la tarea encomendada sin asistencia humana, apoyado por el sistema autónomo LHD *On Board*.

En el entendido que el presente estudio se centra en el objetivo final de autonomía, este capítulo revisará los criterios que se usan para definir los sistemas de control que acompañan la autonomía y estrategias de implementación, como así también los criterios operacionales que deben implementarse para concretarla.

Como marco general relacionado con los criterios y diseños, los sistemas de operación a distancia deben cumplir ciertas características para satisfacer con éxito las necesidades y estándares relacionados con latencia, comunicación, arquitectura y seguridad. En este sentido, la Figura 3-1 muestra los ámbitos generales de un sistema de operación a distancia.

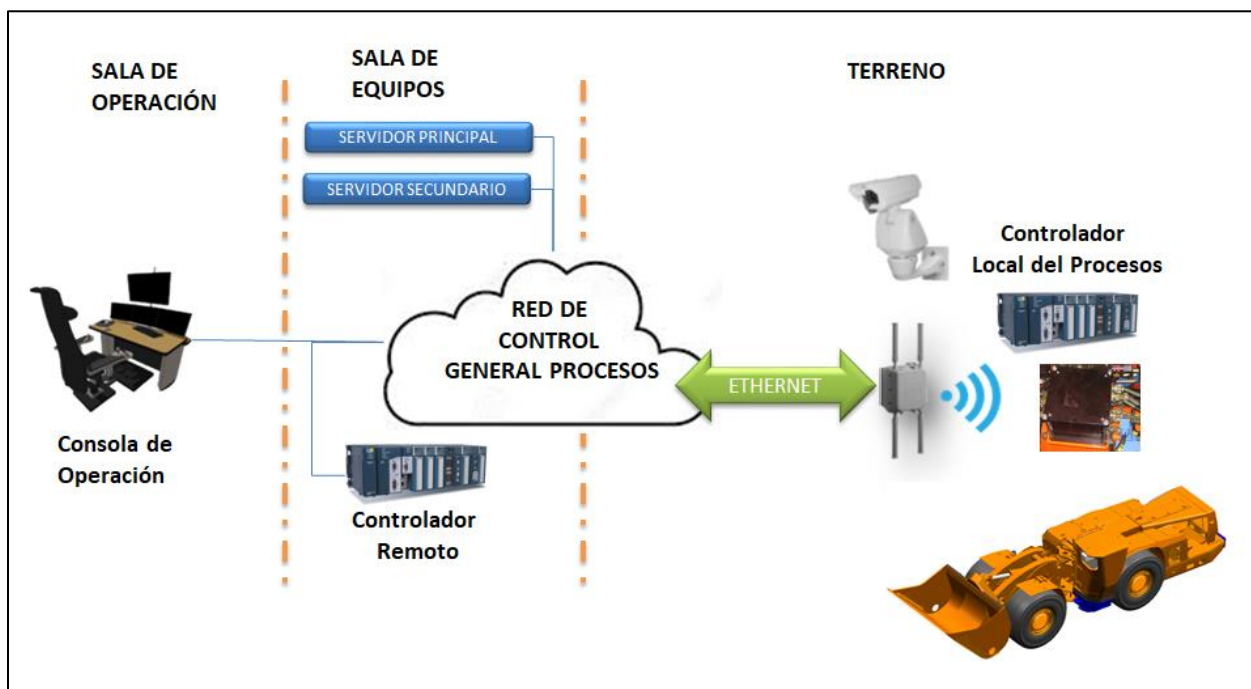


Figura 3-1: Esquema general de operación a distancia

La principal condición que debe cumplir un sistema de operación a distancia es la actualización de video e información en tiempo real, y proveer alta calidad de imágenes en ambientes hostiles (polvo en suspensión, humedad), típicos de las faenas mineras. La maduración de tecnologías como los sistemas de comunicación en base a fibra óptica y las cámaras de alta definición sobre plataformas de variada prestación ha permitido alcanzar altos estándares en estos aspectos.

Por otro lado, la robustez de los sistemas desarrollados ha permitido también cumplir las expectativas de disponibilidad y confiabilidad que aseguren la continuidad del proceso y cumplir con las metas de producción.

En términos de las ventajas de un sistema de operación a distancia, además de las evidentes que representa para la seguridad de las personas la habilitación de un sistema de operación remota, existen otros importantes impactos positivos para el proceso, entre los que se destacan:

- Productividad y eficiencia: La posibilidad de operar simultáneamente equipos que se encuentran a gran distancia entre sí, sin que el operador deba desplazarse, mejora notablemente la productividad y eficiencia del proceso. Además, el hecho de poder monitorear todos los estados del mismo desde una sola estación de trabajo, convierten al operador en agente importante en la gestión de la producción.
- Trazabilidad: A partir de un sistema tele-operado, comienzan a existir registros confiables, tanto históricos como en línea, de los parámetros importantes del proceso, lo que permite un mejor control del mismo, así como el manejo de mayor y mejor información para la toma oportuna de decisiones.
- Integración: La posibilidad de integrar un sistema a una plataforma computacional global de la planta, permite enriquecer los modelos productivos y la interacción con el resto de los procesos.

Es así como hoy han cobrado relevancia los llamados centros integrados de operación y gestión, los que concentran en una sola sala todas las operaciones de una planta, además de estaciones de ingeniería y supervisión que cuentan con software predictivos y aplicaciones informáticas que procesan toda la información disponible, para el más óptimo control y gestión sobre los planes de producción y mantenimiento

Junto con lo anterior, se suma una serie de infraestructura adicional que se describe en el siguiente capítulo.

3.2 CRITERIOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN

Para entender los requerimientos y criterios básicos de diseño de la automatización de equipos LHD en minería subterránea, este capítulo explicará de manera breve cada tópico, siendo los más importantes los siguientes (JRI, 2018):

- Códigos y normas.
- Sala de control.
- Sistemas de control.
- Sistema gestión de la producción.
- Sistema de confinamiento.
- Red WIFI.
- Sistemas *On Board*.
- Zonas de registro.

3.2.1 Códigos y normas

Las condiciones mínimas que deberán cumplir los diseños para los sistemas de control, estarán de acuerdo a los códigos y normas internacionales y nacionales que se identifican a continuación.

- Normas internacionales

Tabla 3-1: Normas y entidades regulatorias internacionales

| Nombre | Descripción |
|---------------------|--|
| ANSI/ISA S95 | Manufacturing Enterprise System Standards and User Resources |
| ANSI | American National Standards Institute |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ATEX | Atmósfera Explosiva |
| EIA | Electronic Industry Association |
| CE | Conformidad Europea |
| CEA | Insulated Cable Engineers Association |
| NCE | Normas de Comunidad Europea |
| CENELEC | Comité Europeo de Normalización Electrónica |
| CSA | Canadian Standards Association (Canadá). |
| EIA | Electronic Industry Association |
| FM | Factory Mutual (USA) |
| ICEA | Insulated Cable Engineers Association |
| IEEE | Institute of Electrical & Electronic Engineers |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| ISA | International Society of Automation |
| ISO | International Standard Organization |
| JIS | Japanese Industrial Standard |
| MSHA | Mine Safety and Health Standard |
| NEC | National Electrical Code |
| NEMA | National Electrical Manufacturer's Association |
| NESC | National Electrical Safety Code |
| NFPA | National Fire Protection Association |
| OSHA | Occupation Safety and Health Act |
| UL | Underwriter's Laboratory |
| FM | Factory Mutual |

- Normas chilenas

Tabla 3-2: Normas y entidades regulatorias chilenas

| Nombre | Descripción |
|--------------------|---|
| DS 72 | Reglamento de Seguridad Minera |
| DS N°594 | Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo |
| INN | Instituto Nacional de Normalización de Chile |
| NCH | Norma Chilena |
| NTS y CS | Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio |
| SEC | Superintendencia Eléctrica y Combustibles Chile |
| SERNAGEOMIN | Servicio Nacional de Geología y Minas de Chile |
| SUBTEL | Subsecretaría de Telecomunicaciones, Chile |

3.2.2 Sala de control

La centralización y recopilación de la información debe hacerse en una sala de control especialmente diseñada para atender los requerimientos de la automatización de los equipos LHD. En este sentido, y siguiendo la tendencia mundial, la sala de control se ubica en un lugar que aporte una mejor calidad de vida al operador y supervisor, y que comúnmente es en superficie o en la ciudad más cercana.

La sala de control debe contar con estaciones de operación que, en caso de requerirlo, permitirán operar en modo tele-operado y tele-asistido. La cantidad de estaciones dependerán de la estrategia definida por cada mina. Así por ejemplo, en algunas minas la relación equipos/estaciones es de 2:1 ó 3:1, lo que se traduce en que un (1) operador podrá controlar a distancia 2 ó 3 equipos.

Es común que las minas tengan una sala de control secundaria en interior mina cuyo objetivo principal es servir de redundancia en la eventualidad de una interrupción en la comunicación con la sala de control principal, o bien es muy útil en el período de comisionamiento del sistema y equipos, permitiendo probarlos y testarlos a poca distancia con lo que se agiliza las comunicaciones y decisiones, como así también independizar este proceso de la operación de producción que se hace desde la sala de control principal. La Figura 3-2 muestra ejemplos de salas de control.

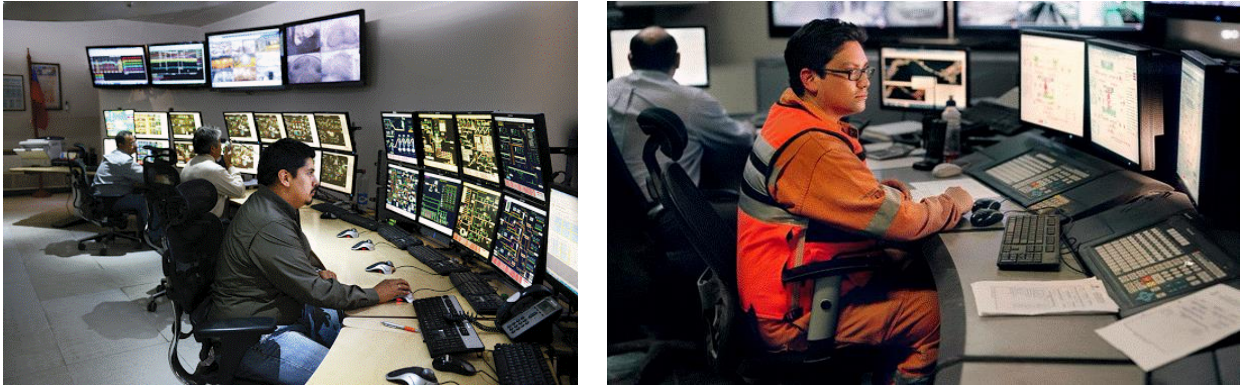


Figura 3-2: Ejemplo de estaciones trabajo en sala de control

3.2.3 Sistemas de control

Para concretar la autonomía se requiere de un sistema de control que se haga cargo y apoye la operación de producción y de los equipos.

El sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de una operación (en este caso, palas LHD de producción), con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados; es decir, corresponde al conjunto de equipos, instrumentos y elementos que ejecutan funciones automáticas de control y monitoreo de variables de proceso, según se muestra en Figura 3-3.

Es importante que los sistemas de control sean estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelo, y sean eficientes según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.

Normalmente el sistema está compuesto por las siguientes partes:

- Sistema de control de procesos.
- Red de comunicación para control de procesos.
- Estaciones de operación y estaciones de ingeniería.
- Servidores para el manejo de los datos.

El sistema de control debe ser una herramienta de seguridad y control, permitiendo la inspección remota de todos los recintos que requieran ser monitoreados. Los principales criterios de selección de los sistemas para la información son:

- Deben operar en forma continua, 24 horas al día, todos los días del año.
- Solución Integrada, donde todos los componentes formen un entorno de trabajo único y estable.
- Sistemas personalizables, para alcanzar los requerimientos exactos necesarios en la sala de control.
- Permitir modos de operación local - remoto - mantenimiento.
- Flexibilidad en la gestión de la información para mejorar el tiempo de reacción de operación.
- Modularidad del sistema y garantía de evolución tecnológica.
- Se requiere que los servidores cuenten con bases de datos abiertas, de forma que los datos puedan ser administrados y utilizados con los fines que estime conveniente.
- Se deben utilizar barreras físicas y ópticas para confinar y evitar el ingreso no autorizado de personas o equipos a zonas al interior de los sectores productivos, donde operen LHD's autónomos. Su transgresión detendrá automáticamente los equipos que se encuentren operando en el sector afectado.
- Los LHD's autónomos deberán contar al menos con los siguientes sistemas *On Board*, cuyos componentes deberán ser de fácil acceso para su mantenibilidad:
 - Monitoreo de signos vitales de la máquina.
 - Cámaras de CCTV (dirigidas hacia el frente, la pala, atrás y a la cabina).
 - Access Point para conexión con las redes WIFI.
 - Sistema anticolidión basado en radares o láser.
 - TAG RFID activo para la identificación del equipo y lector de TAGs para el control de la producción.

- Una vez definida la estrategia operacional, se debe dimensionar la cantidad de estaciones de operación requeridas.

La Plataforma de Integración debe estar diseñada para ambientes industriales, particularmente mineros y con altísima disponibilidad.

El diseño del sistema de control debe ser en base a una filosofía de un sistema abierto, bajo norma ISO, diseñado para proveer una configuración de datos que permitan monitorear, controlar, dar diagnósticos, hacer análisis y cubrir las necesidades de proceso, operación y mantención.

Importante es destacar que los sistemas de control deben trabajar con un sistema de alimentación de energía eléctrica ininterrumpida llamada UPS (*Uninterruptible Power Supply*). La UPS es un equipo electrónico que genera energía eléctrica a partir de baterías con el objeto de mantener en funcionamiento los equipos alimentados en la eventualidad se produzca una interrupción en el suministro de la energía con que opera normalmente.

El sistema de control a proyectar deberá considerar en forma obligatoria la instalación de una UPS, con capacidad suficiente para soportar el funcionamiento del sistema de control por un lapso recomendable de cuatro (4) horas como mínimo de autonomía, para los instrumentos y sistemas localizados en el sector, de forma tal de permitir el respaldo de bases de datos e información desde servidores y realizar el apagado o desconexión ordenado de equipos no críticos. Para instalaciones desatendidas, la UPS a proyectar debe tener capacidad para 4 a 8 horas como mínimo.



Figura 3-3: Sistema de control de automatización

3.2.4 Sistema gestión de la producción

Como punto aparte y considerando la importancia de la extracción de mineral en una mina con método de explotación tipo Panel Caving y el control del tiraje para evitar problemas operacionales (por ejemplo, entrada temprana de la dilución o irregularidad en el cave back), se destaca que el sistema de control a implementar debe considerar un sistema gestión de la producción integral (Figura 3-4), el cual se debe encargarse de realizar la recopilación y gestión de información relacionada con los siguientes tópicos:

- Manejo de material.
- Gestión turno.
- Gestión de flota.

Dentro del sistema de gestión de flota, el sistema debe considerar una filosofía de operación basada en tecnología de transmisión inalámbrica, utilizando una plataforma WIFI de administración centralizada.

Esta red WIFI que atenderá al sistema deberá desplegarse en las calles de la mina, específicamente en donde transitan los LHD durante las labores de producción.

Por su parte, los LHD deberán disponer de equipamiento a bordo con comunicación con la red WIFI para la transmisión de datos de producción, datos del vehículo y los datos de posicionamiento. Esta transmisión de datos se realizará hasta la plataforma que posee la aplicación de rastreo y monitoreo de éstos vehículos cuyo servidor será implementado en la sala de control.

En resumen, para este sistema se recomienda el suministro de los siguientes elementos:

- Servidor sistema de control y gestión de la producción.
- Software de rastreo y localización de LHD.
- Software y bases de datos para regular la operación y despacho de LHD.
- Computador a bordo con pantalla HMI para LHD, con comunicación WIFI.
- Red WIFI con AP.
- Controlador de red inalámbrica para el manejo de AP.

- Lectores RFID para registro de posicionamiento.
- TAG RFID para definir ubicaciones en terreno.



Figura 3-4: Sistema de gestión en producción

3.2.5 Sistema de confinamiento

El sistema de confinamiento se utilizará para segregar las zonas en las que operarán los LHD autónomos y así restringir el acceso de personal y equipos de operación manual a dichas zonas de producción. Según se muestra en Figura 3-5, está conformado por barreras duras, barreras automáticas y/o barreras lógicas. La utilización de barreras duras o físicas estará enfocado para protección de personas, mientras que las barreras automáticas y lógicas serán para segregación operacional de los LHD.

El sistema de confinamiento será utilizado para confinamiento perimetral, operacional y zona de registro.



Figura 3-5: Barrera de confinamiento

Los confinamientos perimetrales se utilizarán para segregar una zona de operación manual con una zona de operación autónoma, a fin de evitar el ingreso de personas o equipos manuales a la zona de operación autónoma. Estarán formados por una barrera dura y una barrera lógica, las que se mantendrán normalmente cerradas mientras se encuentren equipos operando en modo autónomo.

Los confinamientos operacionales se utilizarán para restringir el acceso de personas o equipos manuales a una fracción del área autónoma, durante la operación en modo autónomo de los LHD en el resto del área, permitiendo así asegurar la independencia de la operación autónoma de los LHD con las áreas de operación manual. Estarán formados por una barrera automática más una barrera lógica, o bien, sólo una barrera lógica. Las barreras estarán normalmente abiertas cuando los equipos estén operando dentro del área autónoma.

Para el ingreso de los LHD autónomos a la zona de operación autónoma, se debe proyectar una zona de registro para realizar el cambio de modo de operación de manual a autónoma. La zona de registro se debe ubicar entre la zona de operación manual y la autónoma.

Los equipos que circulen desde y hacia el área autónoma lo deberán hacer, idealmente, sin detener al resto de la flota que se encuentre operando en modo autónomo.

Las zonas de registro deberán contar con un sistema de confinamiento perimetral, para el ingreso de los LHD desde la zona manual a la zona de registro; y por un confinamiento operacional (barrera automática más barrera lógica), para la entrada de los LHD a la zona de operación autónoma, desde la zona de registro.

Las puertas automáticas del sistema de confinamiento serán normalmente operadas en forma remota. No obstante, para situaciones especiales o de emergencia, podrán ser operadas desde terreno, por lo que se contará con paneles de control local en terreno, montados a cada lado de la barrera. Estos paneles de control local contarán con botones para solicitar la activación o desactivación de la puerta, así como también con botón de parada de emergencia. La operación local de las barreras, deshabilita los enclavamientos de seguridad, deteniendo la operación autónoma de los LHD autónomos.

Las puertas manuales se mantendrán normalmente cerradas y serán operadas en forma manual por un operador en terreno, sin embargo, deberá contar con una chapa eléctrica para el desbloqueo remoto de la puerta, desde la sala de control a distancia. Además, deberá contar con enclavamientos que permitan asegurar que es posible ingresar a la zona. No obstante, lo anterior, para situaciones especiales o de emergencia, las puertas manuales podrán ser operadas desde terreno, mediante una llave especial que permita su operación segura. La operación local de las barreras, deshabilita los enclavamientos de seguridad, deteniendo la operación autónoma de los LHD autónomos.

3.2.6 Red WIFI

La red WIFI deberá contar con los siguientes componentes:

- Access Point (AP) montados en terreno con el objeto de mantener con cobertura las zonas de tránsito de los LHD autónomos. Los AP son un dispositivo de red que interconecta equipos de comunicación inalámbricos.
- Controladores Wireless Lan Controller (WLAN Controller o WLC). Administra los AP.
- Servidor de Software de administración de red.

En general, el diseño y materiales de todos los componentes de la red WIFI, deberán ser adecuados para la aplicación y deberán estar de acuerdo con las prácticas estándares o recomendaciones para la aplicación descrita. Un ejemplo de la arquitectura de la red WIFI se visualiza en Figura 3-6.

Todos los equipos de terreno deben poseer las protecciones necesarias para soportar altas vibraciones por detonaciones y tronaduras, alta presencia de polvo y humedad, sus características físicas de funcionamiento deben ser para uso industrial.

Para la red WIFI para el área de producción se recomienda utilizar el estándar IEEE 802.11n, operando en la banda de 2.4 GHz, para difusión a los equipos o acceso, para las cuales se ha comprobado que presenta mayor distancia de propagación en túneles.

Para obtener una mejor calidad de la señal inalámbrica se debe tener en consideración:

- Correcta instalación y orientación de AP.
- Correcta configuración de las potencias de transmisión de los AP.
- Informe de análisis de cobertura inalámbrica.
- Posibilidad de instalación independiente de las antenas direccionales de la posición del AP, a fin de mejorar la cobertura de señal en función de los resultados del informe de cobertura inalámbrica.

En términos de seguridad, la red WIFI debe implementar los siguientes servicios:

- Autenticación: Identificación con un grado aceptable de confianza de los usuarios/equipos autorizados.

- Confidencialidad: La información debe ser accesible únicamente por los usuarios/equipos autorizados.
- Integridad: La información debe mantenerse completa y libre de manipulaciones fortuitas o deliberadas, de manera que siempre se pueda confiar en ella.

3.2.6.1 Access Point (AP)

Los Access Point de la red WIFI proyectados para la comunicación inalámbrica con los LHD autónomos podrán conectarse con múltiples usuarios de manera simultánea. Los AP deberán contar con las siguientes características mínimas:

- Auto diagnóstico con monitoreo.
- Entrega de alarmas de funcionamiento.
- Capacidad de integrarse a protocolos de monitoreo estándar.
- Actualización de firmware desde una plataforma o software de administración.

3.2.6.2 Controlador Wireless Lan Controller (WLAN Controller o WLC)

La red WIFI deberá contar con un WLC en la sala de control, el que estará a cargo de la gestión de radio frecuencia, políticas de seguridad, prevención de intrusos, calidad de servicio y la autenticación centralizada, lo cual brinda movilidad/roaming entre diferentes AP, sin pérdida de

El WLC proyectado para el manejo centralizado y configuración de los AP pertenecientes a la red WIFI, permitirán realizar las siguientes funciones:

- Autenticación centralizada de clientes.
- Manejo centralizado de recurso de radio.
- Mitigación de interferencias, evitando interferencia a través de la correcta asignación de canales y potencia de transmisión, evitando pérdida de paquetes debido a interferencias de una red inalámbrica muy densa.
- Balanceo de cargas entre AP.
- *Auto-Fail Over*, mueve los clientes conectados desde un AP con problemas a un AP disponible.

- Políticas de seguridad.
- Visualización de radio frecuencia de AP.
- Restricción de tráfico por usuarios/grupos de usuarios.
- Calidad de servicio, identificar tipos de paquetes de datos, redireccionar y priorizar tráfico crítico.

3.2.6.3 Servidor con software de administración

Es un servidor que permite una administración unificada a través de las diferentes arquitecturas. Esto ayuda a simplificar la administración para que el usuario tenga una experiencia intuitiva y automatizada. Este servidor trabaja en conjunto con el servidor WLC para configurar y manejar la red inalámbrica.

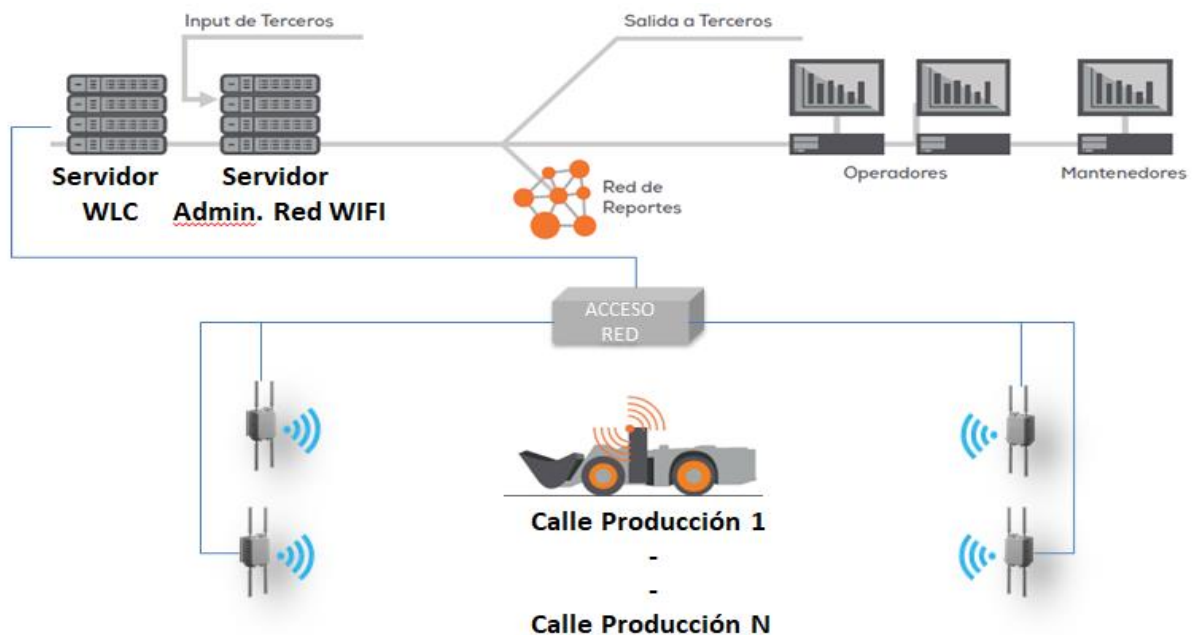


Figura 3-6: Ejemplo de arquitectura de diseño red WIFI

3.2.7 Sistemas On Board

Los componentes del sistema *On Board* montados sobre los LHD deben ser diseñados para operar expuestos a condiciones adversas generadas por la operación del LHD, como por ejemplo golpes, vibraciones, cambios de temperatura, humedad, expuestos a

polvo y agua, entre otras variables propias de operación en minería subterránea. Asimismo, deberán instalarse, en lo posible, en lugares que no sobresalgan de la estructura del LHD a fin de minimizar los riesgos de golpes contra instalaciones existentes, contra las paredes de túneles u otros.

Es así como dentro del área de producción, los LHD autónomos deberán interactuar por medio de sus sistemas de comunicaciones, con sistemas de apoyo proyectados para el proceso de extracción y vaciado de mineral, como son ventilación, control de tráfico, telecomando martillos, entre otros, así como también operarán en forma conjunta con subsistemas propios para la operación autónoma de los LHD, como son tracking, confinamiento y control producción, a fin de permitir la operación autónoma de los LHD al interior de la mina.

El sistema *On Board* permitirá a los LHD operar de forma completamente autónoma sin que sea necesario el apoyo de un operador, salvo labores eventuales como asistencia al carguío. Estará formado por subsistemas de navegación, equipos de comunicación inalámbrica, audio y video, monitoreo de signos vitales del LHD, sistema de confinamiento, selección de modo de operación y modo luces.

Asimismo, permitirá al LHD contar con información de sus signos vitales, lecturas de proximidad a paredes de túneles para navegación al interior del área de producción, detección de presencia de vehículos y/o personal en el área para detención automática, interacción con otros sistemas del proceso, puntos desde donde debe extraer y descargar mineral apoyado por programa de producción (Sistema gestión de la producción), entre otros.

Los LHD se comunicarán en forma inalámbrica con el sistema de control, mediante red WIFI proyectada al interior de la mina, para monitoreo y/o control remoto desde estaciones de operación en sala de control. En estas estaciones de operación se contará con información de los sistemas *On Board* de cada LHD.

Para efectos de mantenimiento, el sistema podrá ser inspeccionado por un ingeniero de mantenimiento en forma remota, pudiendo revisar, entre otros, los siguientes puntos:

- Estado del LHD.
- Estado del sistema *On Board*.
- Estado de los equipos de comunicación.
- Signos vitales del LHD.

Además de lo anterior, el sistema debe contar con todas las facilidades de acceso físico a los implementos para una adecuada mantención.

El sistema *On Board* debe contar como mínimo con los siguientes indicadores o monitoreo:

3.2.7.1 Sistema de navegación

Los LHD deberán contar con un sistema de navegación que permita la integración y procesamiento de variables y sistemas asociados para la generación de las señales de control del equipo cuando éste se encuentre en modo autónomo. La navegación autónoma se realizará por medio del uso de escáner y sensores que monitorean el entorno y posición del LHD al interior del área de producción, a fin de evitar colisiones con paredes, instalaciones y/o equipos. Por medio del sistema de navegación, también se podrá monitorear y controlar la velocidad, RPM, dirección, posición y carga en el balde, entre otros.

Los algoritmos de control deben poseer la inteligencia necesaria para mejorar su funcionamiento a través del reconocimiento de sectores y memorizar áreas y trayectos, ayudando así a enfrentar obstáculos en el camino y mejorar los tiempos productivos de manera de no interferir con las metas y tiempos productivos.

3.2.7.2 Sistema de comunicaciones

La comunicación del LHD autónomo con la red de control de la mina se debe hacer con módulos de comunicación robustos y aptos para operar bajo las condiciones subterráneas.

Cada LHD autónomo deberá contar con cuatro antenas conectadas al módulo de comunicaciones. Estas antenas estarán dispuestas sobre los LHD, dos en la parte delantera y dos en la parte trasera del equipo, a fin de contar con conectividad permanente con la red de control WIFI de la mina.

La pérdida de comunicación entre el LHD autónomo y la red WIFI, implicará una detención automática del LHD, por lo que se requiere de un sistema de alta confiabilidad, predictivo, con retardos no superiores a 500 ms, optimización del ancho de banda y gestión permanente de la señal de radiofrecuencia, por lo que el Proveedor deberá dar especial énfasis a la calidad de servicios del sistema propuesto.

3.2.7.3 Sistema de audio y video

Cada LHD deberá contar con cuatro cámaras *On Board*, tipo *bullet*, dos apuntando hacia el balde para mejorar el proceso de carga, una apuntando hacia atrás del LHD y una

cuarta cámara apuntando hacia el asiento del conductor dentro de la cabina del LHD. Estas cámaras deberán contar con tecnología IP, full HD, visión nocturna y sistema de limpieza.

El sistema de cámaras debe permitir la visualización imágenes de video en tiempo real, así como la captura, transmisión, almacenamiento y recuperación de imágenes a pedido. El video y registro de imágenes permitirá analizar el estado de la infraestructura minera (por ejemplo, estado de los puntos de carga, estado del material, estado de la ruta, entre otros).

Se debe considerar también un sistema de comunicaciones por voz entre la cabina del LHD y la estación de control, para el caso de operación en modo manual. Este sistema estará compuesto por un micrófono y un parlante ubicado al interior de la cabina del LHD. El sistema de comunicaciones por voz estará basado en sistemas de voz sobre protocolo de Internet, el que se conectará al sistema de control del LHD, para comunicación a través de la red WIFI con la sala de control.

3.2.7.4 Sistema de monitoreo de signos vitales

El sistema de monitoreo de signos vitales del LHD debe contar con un sistema de monitoreo y autodiagnóstico de sus componentes de hardware, software y firmware, que minimice el tiempo medio de reparación o MTTR (*Medium Time To Repair*) de estos sistemas. Entre las alertas relevantes se encuentran el nivel de combustible, presión y temperatura de neumáticos, presión y temperatura de aceite, estado de sensores, entre otros.

Adicionalmente, y si bien es cierto no es una variable vital del estado del LHD, se recomienda considerar la lectura del peso cargado por la pala mediante un pesómetro instalado en el LHD, ya que representa una variable fundamental para el control producción de cada máquina.

3.2.7.5 Sistema de confinamiento

El LHD transitará en áreas de operación manual y autónoma, donde existirán zonas de registro para pasar de modo manual a autónomo y viceversa, zonas con segregación o confinamientos operacionales y de seguridad, en base a barreas duras y barreras lógicas, por lo que se deberá contar con los elementos que le permitan interactuar de forma continua con estos dispositivos sin afectar el normal funcionamiento de la operación.

La interacción con los distintos sistemas de segregación y de apoyo, se realizará a través de la red de control en forma inalámbrica.

3.2.7.6 Sistema de selección de modo de operación

Se deberá considerar un sistema de selección del modo de operación del LHD. Este sistema estará basado en un selector que permitirá realizar el cambio de operación de modo manual a modo autónomo y viceversa. Esta operación se realizará sólo en zonas de registro proyectadas para este efecto.

El selector Manual/Autónomo deberá contar con sistema de bloqueo de seguridad, a fin de realizar el bloqueo del selector cuando este se encuentre en la posición de operación en modo Manual.

3.2.7.7 Luces de estatus (código de luces)

Los LHD autónomos deberán considerar el suministro de un sistema de luces formado por tres luces, de color sugerido verde, naranja y rojo, cuya función será indicar de forma visual el estado del LHD. La función de cada una de las luces se indica a continuación:

- Rojo: la luz roja indicará que el LHD se encuentra en Modo Autónomo.
- Naranja: la luz naranja se encenderá en casos de detención rápida de los LHD y podrá indicar dos estados:
 - Naranja parpadeante: indica retardo de la liberación de la parada rápida. No es posible acercarse al LHD.
 - Naranja Continuo: indica parada rápida. Es posible acercarse al LHD.
- Verde: la luz roja indicará que el LHD se encuentra en Modo Manual.

Un ejemplo de equipamiento *On Board* se muestra en Figura 3-7.



Figura 3-7: Ejemplo equipamiento *On Board* típico

3.2.8 Zonas de registro

Los LHD operarán en modo autónomo sólo al interior de la zona de producción autónoma, y fuera de ésta operarán en modo manual. Para el ingreso de los LHD a la zona de operación autónoma, éstos deberán pasar por una Zona de Registro para realizar el cambio de modo de operación, ubicada entre la zona de operación manual y la autónoma, segregada por medio de barreras físicas (portones) y barreras lógicas. Un ejemplo de esta configuración se visualiza en Figura 3-8.

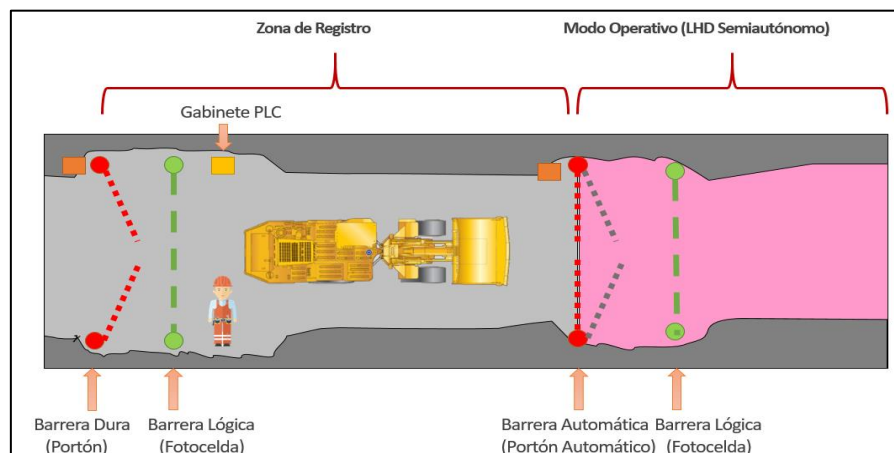


Figura 3-8: Ejemplo zona de registro

Por lo tanto, las Zonas de Registro son la interfaz entre la operación manual y la autónoma. Aquí el operador en terreno puede tomar control del equipo si es que se requiere que la pala salga del área de producción (por ejemplo, ir a taller de mantenimiento), como también dejar el equipo para retomar producción controlado a distancia.

3.3 CRITERIOS OPERACIONALES EN EL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN

Importante es definir un módulo inicial de operación que, junto a un buen diseño minero de automatización, dé fluidez y continuidad al proceso de extracción de los equipos LHD, y permita eliminar o minimizar las interferencias propias generadas por la operación de producción y de construcción.

En este sentido, el proceso minero típico que se busca dar continuidad operacional se muestra en la Figura 3-9 (JRI, 2019).

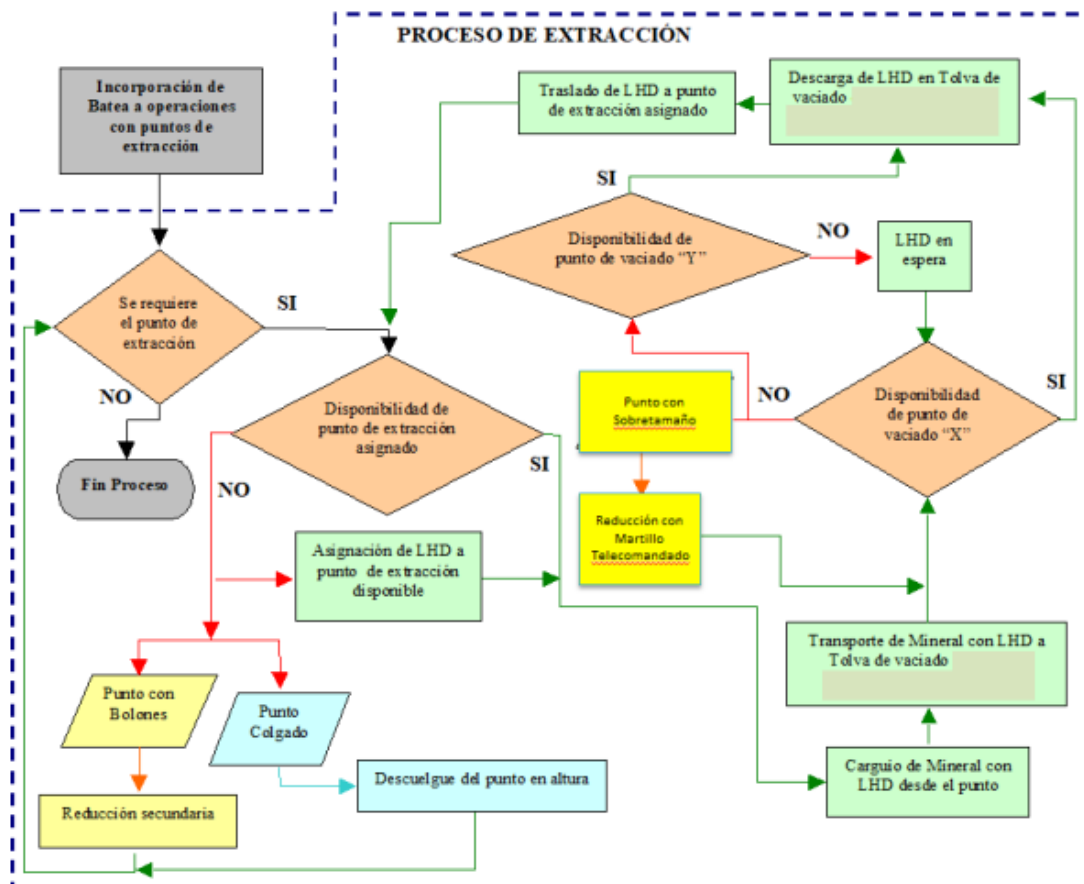


Figura 3-9: Proceso de extracción típico

Por lo tanto, el diseño minero de módulo inicial del nivel de producción (calles y zanjas) debe ser funcional a la operación de LHD en modalidad automatizada.

Uno de los puntos más importantes que el diseño debe considerar es que debe permitir aislar determinadas zonas del área automatizada sin afectar la producción global o parcial de la mina. Es decir, debe ser capaz de permitir el ingreso de personal o equipos al sector aislado sin que provoque la paralización de producción de la mina.

Por otro lado, tanto las dimensiones de calles y zanjas como el diseño de las curvas en las galerías deben ser compatible con los requerimientos que el proveedor de la tecnología tenga a este respecto (distancias mínimas entre la pared del túnel y el costado del equipo, radio de curvatura mínimo para curvas de 20 km/h de velocidad, etc.)

Asimismo, un punto importante a considerar en este módulo inicial es la convivencia entre la operación de estos equipos automatizados y los trabajos de desarrollo y construcción que son propios de minas en preparación. Hay requerimientos mínimos para iniciar la automatización, como también distancias mínimas para que ambos tipos de actividades convivan.

Una identificación de los puntos más relevantes que definen el diseño y módulo inicial se mencionan en los siguientes puntos.

3.3.1 Mantenibilidad y confiabilidad de los equipos en el diseño de la automatización

Las características del diseño minero que generan mayor impacto en la Mantenibilidad y Confiabilidad de los LHD son las siguientes:

- Dimensiones de las galerías por las que se desplazan los equipos.

Un diseño de ancho de las galerías insuficiente respecto de las dimensiones del equipo provocará la pérdida de co-linealidad y operarán los sensores de proximidad a las paredes de las galerías, obligando a detener el equipo por razones de seguridad. También puede darse el caso que el equipo impacte contra las paredes debido al retardo en la reacción de los actuadores, provocando daños estructurales (cabina, chasis) y en los componentes del sistema de automatización *On Board*.

Ambos tipos de eventos generan interrupciones de la operación, ocasionando una pérdida de confiabilidad del equipo.

- Confinamiento del área en que opera el equipo.

Un diseño minero que no cautela la segregación de los distintos equipos automatizados que operan en un sector termina afectando negativamente la mantenibilidad de dichos equipos. Es decir, ante la ocurrencia de una anomalía todo el sector en producción debe ser detenido para permitir el ingreso del personal de mantenimiento. Este tipo de situaciones generan mermas productivas en el global de la mina y afecta negativamente el indicador de utilización del parque de equipos.

- Control de derrames y limpieza de calles.

Los derrames de material y la consiguiente tardía detección de éstos, sumado a la falta de limpieza oportuna, ocasionan en primer término daños a los neumáticos y, eventualmente, fallas en ejes y otros componentes del tren de potencia.

Estas situaciones deterioran la confiabilidad del equipo y afectan negativamente la mantenibilidad de los mismos, cada vez que este tipo de reparaciones se deben realizar en terreno o in situ, lo cual deteriora la efectividad y eficiencia de las reparaciones, debido a falta de infraestructura y condiciones ambientales apropiadas.

3.3.2 Interferencias operacionales en el diseño de la automatización

Existen diversas fuentes de interferencias con el ciclo productivo principal de los LHD que, en algunos casos, son inherentes a la actividad minera. El diseño debe, de algún u otra forma, eliminar o minimizar la ocurrencia o impacto de éstas sobre el tiempo efectivo de operación de los LHD. Las interferencias operacionales más comunes son:

- Reducción secundaria: Actividad que tiene por objetivo el tronar el sobre tamaño que aparece en los puntos de extracción. El procedimiento suele indicar la paralización de actividades y evacuación en torno a él o los puntos de extracción afectados, ingreso de la cuadrilla, carga de explosivos, evacuación de la cuadrilla, tronadura, ventilación y chequeo de infraestructura.
- Mediciones geomecánicas: Actividad para comprobar la estabilidad y resistencia de la estructura de la mina.
- Mantenión de infraestructura: Existen dos situaciones posibles. La primera es la mantención de la infraestructura de comunicaciones del sistema autónomo instalado en la calle de producción, la cual permite el funcionamiento de la tecnología. La segunda, la mantención de la infraestructura del túnel.

- Muestreos: Actividad que tiene por objetivo tomar muestras desde los distintos puntos de extracción para llevar un control de la ley o estado agua/barro de éstos.
- Abastecimiento de combustible: Los equipos deben abastecerse de combustible para dar continuidad operacional en la producción. Esta actividad habitualmente afecta de manera importante cuando los centros de abastecimiento se encuentran a una distancia importante del lugar donde operan los equipos.

3.3.3 Requisitos de la construcción en el diseño de la automatización

En los proyectos mineros es importante definir el momento en que la automatización puede materializarse y convivir con las actividades de desarrollo y construcción del resto de la mina, como así también contar con la infraestructura completamente construida en el área que se va a operar con palas autónomas. Esto se define como el módulo inicial de operación.

En este sentido, se han definido una serie de criterios mínimos que deben considerarse para dar inicio a operación automatizada y que definen este módulo inicial de operación. Muchos de estos criterios tienen que ver con seguridad, tanto para las personas que deben trabajar en la cercanía de la zona a automatizar, como también para los equipos (sensores e infraestructura de automatización) producto de actividades cercanas o propias del equipo (BCTEC, 2019).

- Minería.

Como requisito mínimo se debe considerar que la minería asociada a calles, zanjas y punto de vaciado se encuentre desarrollada y terminada, con su fortificación definitiva instalada.

- Calles.

Las calles por las que circularán los equipos LHD deben contar con carpeta de rodado (o asfalto, dependiendo del criterio de ingeniería) en su totalidad, desde el punto de carguío hasta el punto de vaciado.

Así también deberá contar con la infraestructura civil finalizada, como lo es puntos de extracción, muros de confinamiento o muros guías, brocales del punto de vaciado, parrillas, etc.

- Sistema de traspaso.

El sistema de traspaso asociado a los puntos de extracción habilitados debe estar construido y operando. Este sistema hace mención con el punto de vaciado habilitado y su respectivo equipo de reducción de tamaño (si hubiere) instalado en el mismo u otro nivel.

- Puntos de extracción habilitados.

La automatización se puede iniciar teniendo solo un (1) punto de extracción habilitado. Sin embargo, dependiendo de la configuración minera y de planificación del proyecto, este número puede variar. Así por ejemplo, dependerá de la ubicación del punto de vaciado y el secuenciamiento de la incorporación de área respecto de éste, de la disponibilidad (implementación) en terreno de la tecnología de automatización, actividades en calles aledañas, distancia de seguridad y convivencia con actividades de desarrollo y construcción, entre otros.

El secuenciamiento de la incorporación de área respecto del punto de vaciado es relevante para la definición de la cantidad de puntos de extracción habilitados para el módulo de automatización inicial. Este secuenciamiento determinará si se requiere una cantidad mínima punto de extracción para iniciar la automatización o una cantidad mayor. En la Figura 3-10 se muestra esquemáticamente la dirección de incorporación de área acercándose al punto de vaciado. En este caso es de norte a sur. Asumiendo que el punto de vaciado mostrado sea el primero de las calles mostradas, por un tema de constructibilidad esta situación obliga a incorporar todos los puntos de extracción que se ubican hacia el norte del punto de vaciado. La cantidad de éstos dependerá de la configuración del *layout* de nivel de producción, pero, según lo explicado en el punto anterior, el sistema de traspaso es imprescindible para establecer el módulo inicial de automatización.

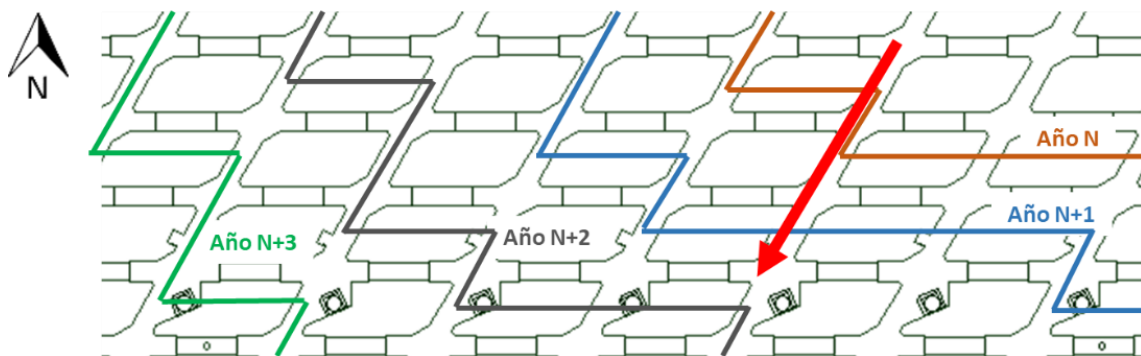


Figura 3-10: Incorporación de área se acerca al punto de vaciado

El otro caso lo muestra la Figura 3-11 que esquematiza un secuenciamiento norte-sur que se aleja del punto de vaciado. Suponiendo que el punto de vaciado sea el primero de las calles dibujadas, esta configuración permitiría establecer el módulo inicial de automatización con dos (2) puntos de extracción, las primeras hacia el sur del lado este y oeste. No puede ser un número menor debido a condiciones de seguridad y la interacción entre la construcción y la zona exclusiva de la automatización.

En aquellas calles de producción periféricas del *layout* del nivel de producción en que se tengan puntos de extracción solo a un costado de ésta, el módulo señalado pudiese configurarse con solo un (1) punto de extracción.

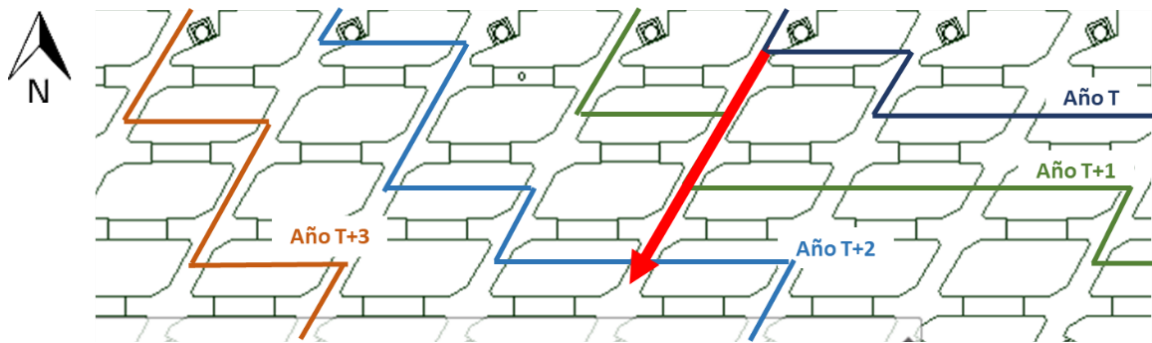


Figura 3-11: Incorporación de área se aleja al punto de vaciado

Por su parte, por temas de seguridad, no está permitido realizar trabajos en el punto de extracción de la calle aledaña asociado al punto de extracción habilitado para la automatización. Una interacción de este tipo puede resultar en graves resultados considerando que se encuentran en zonas de extracción de mineral que están en continuo e impredecible movimiento.

Dependiendo del método de explotación, los puntos de extracción no incorporados a la producción y que no se encuentren quemados, deberán quedar fuera de la zona a automatizar por motivos de seguridad con el objeto de eliminar interacción hombre/máquina.

Por su parte, las barreras duras que delimitan la zona de automatización deben tener en cuenta una distancia de seguridad mínima de una (1) zanja respecto de las actividades de construcción con el objeto de minimizar interferencias y potenciales incidentes con los equipos de construcción y las barreras duras (choques).

Las actividades de desarrollo debiesen estar al menos a 150 m de distancia con el objeto que las ondas expansivas de los explosivos no afecten los sensores ubicados en terreno.

- **Suministros.**

Debe contar con todos los suministros necesarios para atender la minería de la zona automatizada, como por ejemplo: agua, energía eléctrica y aire comprimido (si aplicase).

- **Sistema de automatización.**

Deberá contar con todo el sistema descrito en el Capítulo 3.2, tanto en terreno como en el equipo y en la sala de control. Importante es considerar plazos para segregrar áreas, tener zonas de registro habilitadas, barreras duras y lógicas, implementar sala de control, etc.

3.3.4 Reglas operacionales a considerar en el diseño la automatización

En términos generales, la operación de la automatización deberá seguir reglas para asegurar que los equipos LHD operen de forma continua y minimizar interrupciones (JRI, 2018). Estas reglas varían dependiendo de la realidad de cada faena o diseño implementado, pero dentro de las reglas más comunes a aplicar en el módulo de operación aislado se encuentran las siguientes:

- El equipo LHD autónomo es asignado a la calle con menor cumplimiento dentro de las mismas disponibles.
- Una vez asignada una calle a un equipo LHD semiautónomo (SA), este extrae el mineral de acuerdo al plan diario de extracción.
- El equipo LHD autónomo realiza la carga de mineral en forma tele-operada, completando el resto del ciclo, viaje, descarga y regreso en forma autónoma.
- Para la operación de carguío se solicita un tele-operador, si no existe alguno disponible, el LHD autónomo espera en la zanja hasta que se libere un tele-operador.
- Si se cuelga un punto de extracción, el equipo LHD autónomo cambia a la siguiente zanja con mineral programado en la calle. Si no encuentra otro punto para cargar, busca otra calle.

- Dentro del ciclo de extracción de mineral, antes de descargar el equipo LHD autónomo revisa primero que exista capacidad de vaciado y posteriormente que no se haya superado la capacidad de material sobre la parrilla,
- Si no existe capacidad de vaciado y/o no ha finalizado la operación de reducción de material de sobretamaño en parrilla, el equipo LHD autónomo espera cerca del punto de vaciado.
- Si hay capacidad de vaciado verifica si hay otro LHD descargando para evitar colisiones.
- Si la calle donde está operando un equipo LHD autónomo queda fuera de operación por falla en el martillo, el equipo LHD busca otra calle o punto de vaciado que tenga martillo disponible.
- Si el equipo LHD autónomo no encuentra destino, espera hasta que haya nuevamente una calle disponible.
- Una vez que el equipo LHD SA ha recorrido todas las zanjas programadas en la calle, busca otra calle con mineral. La calle actual pasa a colgada si tiene puntos colgados o a agotada en caso contrario.
- Si una calle pasa a colgada, se solicita una cuadrilla de reducción secundaria la cual realiza el procesamiento de los puntos colgados.
- Si una cuadrilla de reducción secundaria requiere ingresar a una calle, se detienen los equipos LHD SA en el entorno para dar paso a la cuadrilla, reanudando su operación una vez que la cuadrilla ha ingresado y se encuentre confinada en la calle requerida.
- Una vez finalizado el proceso de reducción secundaria, en caso de haber mineral programado aun sin extraer en los puntos que fueron descolgados, la calle queda disponible para operar, o en caso contrario, pasa a agotada.
- Al salir la cuadrilla de reducción secundaria desde a una calle, se detienen los equipos LHD SA en el entorno para dar paso a la cuadrilla, reanudando su operación una vez que la cuadrilla ha salido por alguno de los accesos al nivel de producción.

3.4 DEFINICIÓN MÓDULO INICIAL DE OPERACIÓN

En virtud de lo expuesto anteriormente en este capítulo, los requisitos mínimos a considerar para definir un módulo inicial de operación para automatizar con equipos LHD se resumen en los siguientes puntos:

- Criterios técnicos:

El detalle de lo requerido se encuentra detallado en Capítulo 3.2, siendo los más relevantes a considerar -y que deben estar implementados al momento de materializar el módulo inicial de operación- los siguientes:

- Sala de control. Debe contar con una sala de operaciones remota que controla y dirige las actividades de la automatización de los equipos en terreno. Muchas faenas cuentan con una sala secundaria en interior mina con el objeto de apoyar el comisionamiento, actividades de mantenimiento y contingencia operacional.
- Sistemas de control. Conjunto de equipos, instrumentos y elementos que ejecutan funciones automáticas de control y monitoreo de variables de proceso.
- Sistema gestión de la producción. Realiza la recopilación y gestión de información relacionada con el manejo de material, gestión del turno y gestión de la flota.
- Sistema de confinamiento. Segrega las zonas en las que operarán los LHD autónomos y restringen el acceso de otros equipos o personas a dichas zonas de producción.
- Red WIFI. Transmite la información y datos entre el equipo y el Sistema de Control.
- Sistemas *On Board*. Permiten a los LHD operar de forma completamente autónoma sin que sea necesario el apoyo de un operador. Están formado por subsistemas de navegación, equipos de comunicación inalámbrica, audio y video, monitoreo de signos vitales del LHD, sistema de confinamiento, selección de modo de operación y modo luces.
- Zonas de registro. Zonas donde se realizan el cambio de modo de operación (manual a autónoma, y viceversa), segregadas por medio de barreras físicas (portones) y barreras lógicas.

- Criterios operacionales:

Dentro de los criterios técnicos a considerar en el diseño global (minero y de automatización) del módulo inicial de operación, se debe tener en cuenta los siguientes puntos -y que se encuentran descritos en el Capítulo 3.3-:

- Mantenibilidad y confiabilidad de los equipos. El diseño debe tomar en cuenta las dimensiones de las galerías por las que se desplazan, el área a confinar los equipos, y el control de derrame y limpieza de calles, con el objeto de minimizar la mantención correctiva de los equipos.
- Interferencias operacionales. El diseño debe, de algún u otra forma, eliminar o minimizar la ocurrencia o impacto de interferencias operacionales sobre el tiempo efectivo de operación de los LHD, entre los que se destacan: reducción secundaria, mediciones geomecánicas, mantención de infraestructura, muestreos y abastecimiento de combustible.
- Actividades y requisitos de construcción. Debe convivir con actividades de desarrollo y construcción del resto de la mina, como así también contar con la infraestructura completamente construida en el área que se va a operar con palas autónomas. Se debe considerar la minería, las calles, sistema de traspaso, puntos de extracción habilitados, suministros, sistema de automatización.

Un resumen de las actividades y requisitos de construcción en el diseño de la automatización se desglosa en la siguiente tabla:

Tabla 3-3: Definición de módulo inicial de operación

| DISEÑO | CRITERIO |
|----------------------------------|--|
| Minería | Terminada y con fortificación definitiva instalada |
| Calles | Infraestructura civil construida, en particular carpeta de rodado instalada en toda la trayectoria de los LHD. |
| Puntos de extracción habilitados | Mínimo uno (1), pero dependerá de las definiciones de cada proyecto basados en la programación de obras requeridas, distancias de seguridad con otras actividades, e incorporación de área v/s punto de vaciado. |
| Sistemas de traspaso | Mínimo uno (1), terminado, construido y habilitado. |
| Suministros | Instalados en terreno. |
| Sistema de automatización | Instalados (terreno, barreras duras y lógicas, equipo y sala de control). |

- Reglas operacionales:

Para la programación de la automatización se deben considerar una serie de reglas que dan cumplimiento al programa productivo de un turno y que los equipos LHD operen de forma continua y minimizar interrupciones.

Estas reglas están descritas en el Capítulo 3.3.4 a modo referencial, pudiendo cambiar los criterios dependiendo de las necesidades y realidades de cada faena o diseño considerado.

4 CAPÍTULO IV: EJEMPLO DE APLICACIÓN SISTEMA LHD AUTÓNOMO

4.1 INTRODUCCIÓN: PROYECTO ANDESITA - DIVISIÓN EL TENIENTE

El Proyecto Andesita se inserta en el Plan de Desarrollo (PD) de División El Teniente (DET), como una estrategia de profundización gradual en múltiples sectores y frentes de explotación, haciendo uso de infraestructura existente y acompañando el rediseño de explotación del Proyecto Nuevo Nivel Mina (PNNM) (JRI, 2019).

Este proyecto se ubica geográficamente en la parte Norte de la mina El Teniente, en el halo de mineralización del yacimiento en una elevación intermedia entre la mina actual y el PNNM, bajo los depósitos Quebrada Teniente / Dacita y al oeste de la mina Reservas Norte, según se muestra en Figura 4.1 y Figura 4.2. El polígono que delimita las reservas mineras del sector está acotado en su parte Norte por los límites de explotación de Recursos Norte, al Sureste por la Brecha Braden y hacia el Oeste por el macizo virgen.

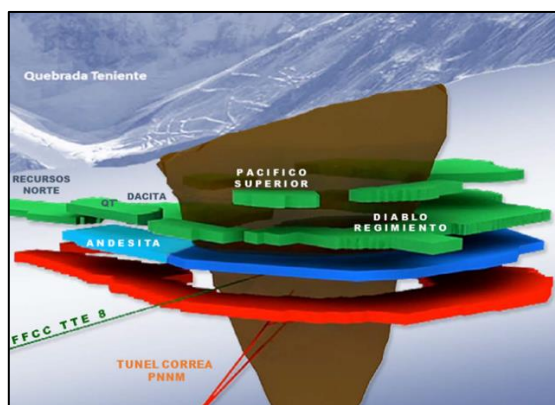


Figura 4.1: Ubicación del Proyecto Andesita en mina El Teniente (vista isométrica).

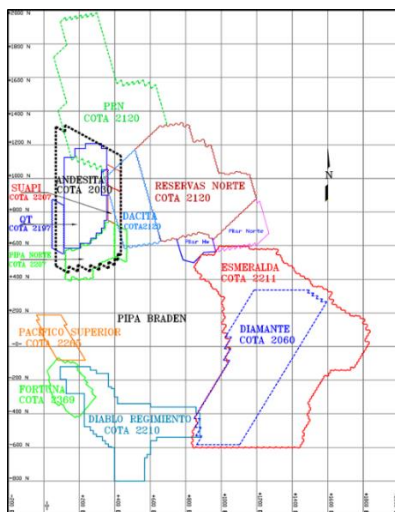


Figura 4.2: Ubicación del Proyecto Andesita en mina El Teniente (vista planta)

El proyecto contempla la explotación por el método Panel Caving Convencional y aplicación de fracturamiento hidráulico. Bajo este contexto, se considera un ritmo de explotación de 25 ktpd, 18 años de vida útil e inicio de producción el año 2023.

La Figura 4.3 muestra de forma esquemática la distribución de los niveles indicados para el manejo de minerales definido en el Proyecto Andesita.

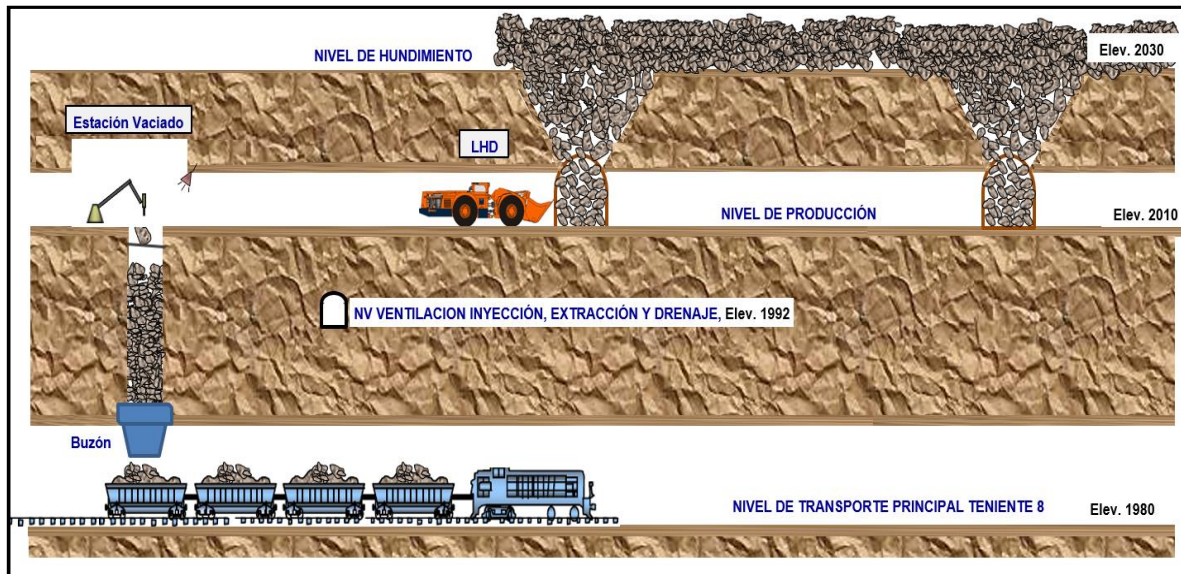


Figura 4.3: Esquema del manejo de minerales del Proyecto Andesita

El sistema de manejo de minerales en el nivel de producción, consta de las actividades de extracción del mineral desde los puntos de extracción, traslado hasta las estaciones de vaciado con descarga sobre parrillas en las tolvas.

La configuración de su nivel de producción consta de 23 calles con inclinación de 60° en dirección NW, con zanjas en dirección N-S, con malla tipo Teniente de 17 m x 20 m. Los puntos de vaciado se ubican fuera del *footprint*, con cinco tolvas hacia el lado Oeste y cuatro tolvas hacia el lado Este, tal como se aprecia en la Figura 4.4.

Para la operación de extracción en el nivel de producción se ha definido utilizar equipos LHD autónomos -sin personal a bordo- operados desde la sala CIO en Rancagua (para carguío a distancia). Estos equipos operarán en forma autónoma al interior de la zona de producción y en modo manual fuera de ella (por ejemplo, traslados a taller).

Los equipos LHD tendrán una capacidad de 10,7 m³ y operarán en semi-calles de producción, los cuales cargarán mineral en los puntos de extracción, lo transportarán y descargarán en las estaciones de vaciado, ubicadas en la periferia del polígono de explotación, pertenecientes al nivel de producción.

En las estaciones de vaciado se consideran parrillas y martillos picadores para reducir y traspasar el mineral a un tamaño de 40" x 40". El mineral traspasado por estas parrillas, se acumula en tolvas, desde donde, y mediante buzones electrohidráulicos ubicados en la base de las tolvas, son cargados trenes metaleros que transportarán el mineral por el nivel Teniente 8 a superficie, descargando en el Concentrador Colón.

También en este nivel se ubica infraestructura de apoyo como talleres de mantenimiento, y barrio cívico con oficinas, sala local de tele comando y sala sistema de operación de equipos LHD autónomos y entre otros.

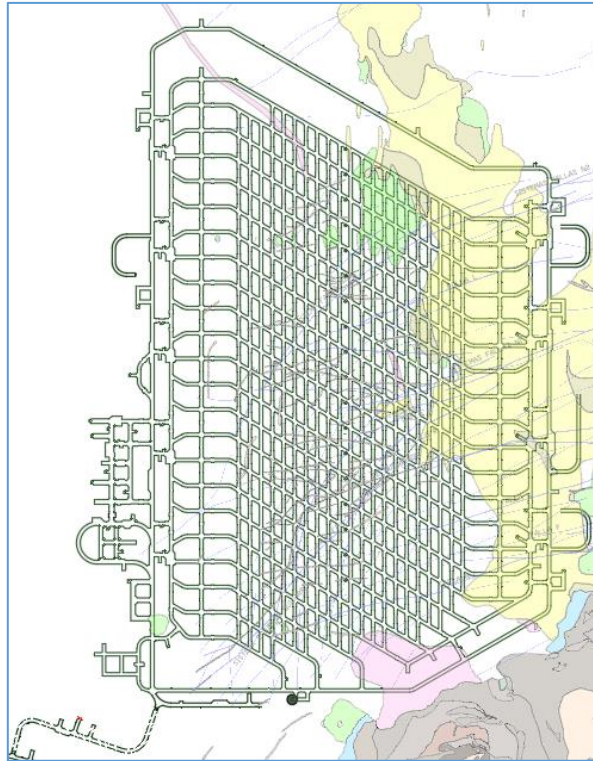


Figura 4.4: Disposición general del nivel de producción del Proyecto Andesita

Uno de los pilares en que se sustenta este proyecto dice relación con el grado de automatización que tendrá en los equipos LHD. Se considera una serie de criterios técnicos y operacionales los cuales se describirán en este capítulo, como así también la materialización del módulo inicial de operación.

La zona a automatizar en el proyecto dice relación con todos los puntos de extracción, calles de producción y vaciado de mineral, según se destaca en la Figura 4.5. Quedan fuera de esta área el Barrio Cívico, talleres y accesos.

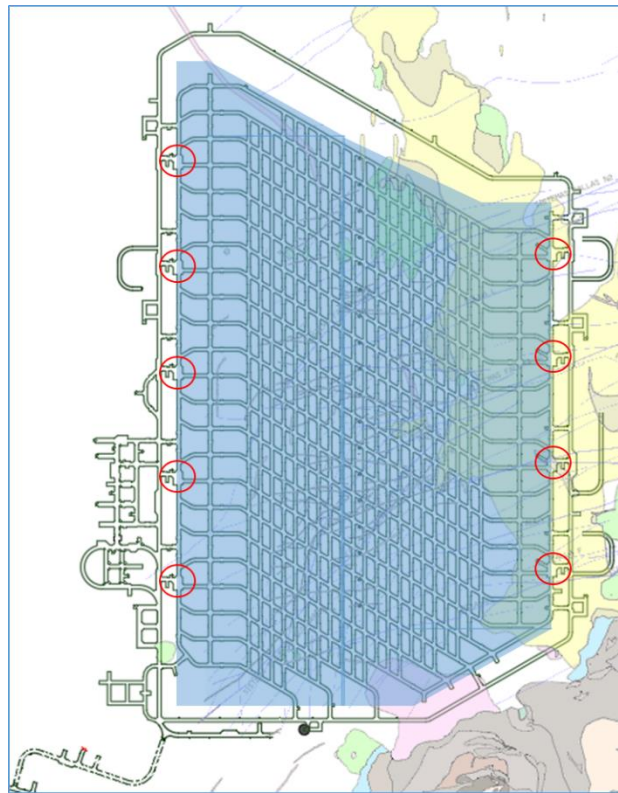


Figura 4.5: Zona a automatizar (azul) y ubicación tolvas de vaciado (rojo) del Proyecto Andesita

Cada calle de producción se ha dividido en dos (2) semi-calles, siendo el eje central las chimeneas de inyección que alimentan estas calles. La actividad de extracción de mineral o carguío se realiza con un equipo LHD por cada semi-calle con la restricción de que la semi-calle en la cual se esté realizando el carguío debe estar confinada. La operación de carguío del LHD es independiente a lo que se esté realizando en otras calles, cruzado y/o socavón.

Los equipos LHD que operen en el sector Oeste del eje central del polígono de explotación vaciarán en las tolvas ubicadas en el Oeste, y del eje central hacia el Este vaciarán en las tolvas del Este. Ante una eventualidad operacional (mantención de buzón, martillo o tolva), la calle completa pudiese vaciar en una misma tolva, en desmedro de la productividad de la pala.

La descarga de los equipos LHD se realizará en forma autónoma en las estaciones de vaciado de mineral. Cada estación de vaciado constará con un martillo picarrocas y tendrá tres (3) puntos de descarga, tal como se muestra en la Figura 4.6.

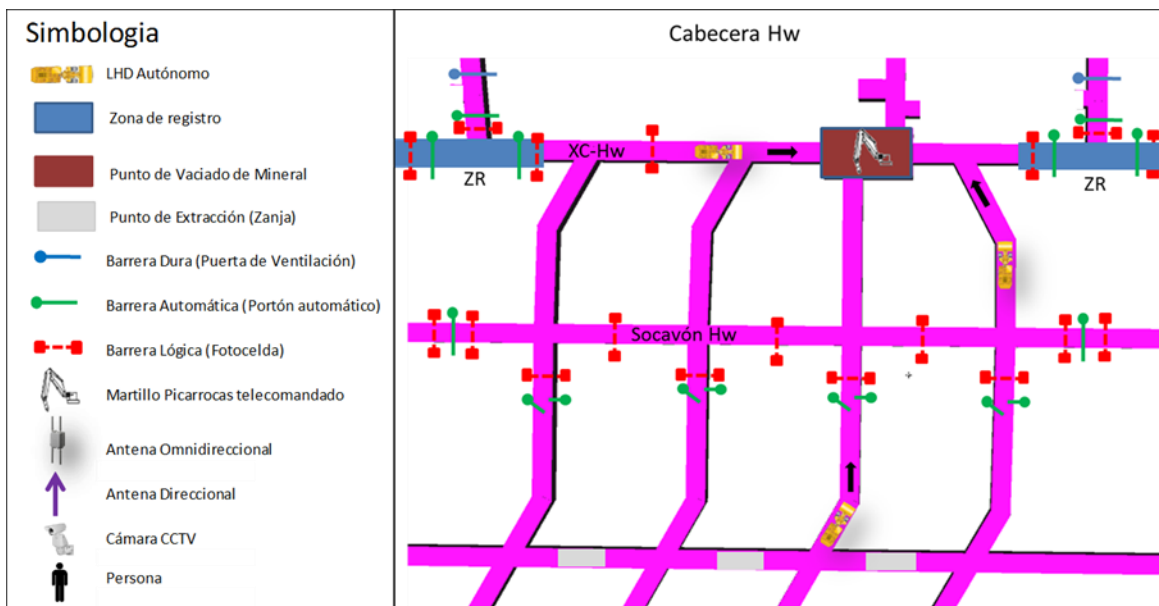


Figura 4.6: Operación de descarga de mineral en la Estación de Vaciado

El equipo LHD tendrá acceso a la estación de vaciado por una calle y para acercarse a realizar la operación de descarga de mineral el martillo picarrocas no debe estar operando y debe encontrarse fuera de la zona de descarga (parrilla). Si el martillo picarrocas está operando, el equipo LHD debe quedar en modo de espera, hasta que desde la sala de control el operador determine el reinicio del equipo para que realice la descarga. El estado del martillo es conocido por el equipo LHD, mediante interfaz de comunicación desde el sistema central.

El estado de llenado del pique se monitorea con sensor ubicado en el techo de la estación de vaciado, el cual es conocido por el equipo LHD antes de realizar la operación de vaciado.

4.2 CRITERIOS TÉCNICOS

4.2.1 Sala de control

Proyecto Andesita considera una sala de control en superficie en el Centro Integrado de Operación (CIO) que tiene División El Teniente ubicado en Rancagua. Esta sala albergará las estaciones de operación necesarias para el funcionamiento normal de la mina. Su configuración será una (1) estación de trabajo por tres (3) equipos LHD, se puede observar en Figura 4.7 (JRI, 2019).



Figura 4.7: Sala de control en superficie

Asimismo, el proyecto considera una Sala de Operación Secundaria que se ubicará en el Barrio Cívico en Interior Mina, como se observa en Figura 4.8. Esta sala tendrá como objetivo operar ante una eventual falla en las comunicaciones de la mina Andesita con sala de control en Rancagua, como también se utilizará durante el período de comisionamiento o mantenciones del sistema. La Sala de Operación Secundaria tendrá una capacidad operativa dimensionada pensando en que operará ante eventos excepcionales, como apoyo a la operación, y en la puesta en servicios de los sistemas, no considerando la operación a plena capacidad de la mina Andesita.

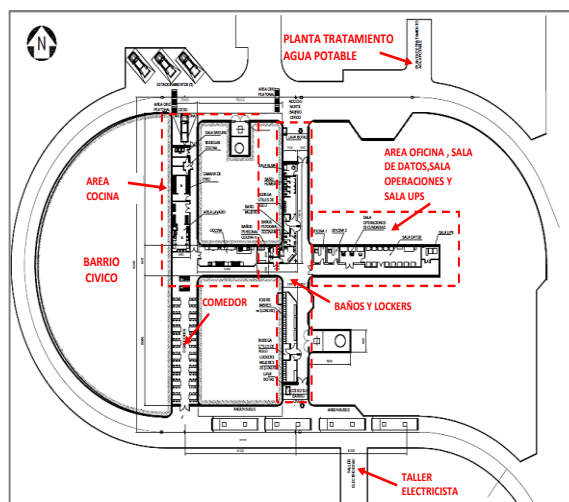


Figura 4.8: Sala de control secundaria en interior mina

4.2.2 Sistemas de control

Dentro del área de producción del Proyecto Andesita los LHD autónomos deberán interactuar por medio de sus sistemas de comunicaciones con sistemas de apoyo proyectados para el proceso de extracción y vaciado de mineral, como son ventilación, control de tráfico, telecomando martillos, entre otros; así como también operarán en forma conjunta con subsistemas propios para la operación autónoma, como tracking, confinamiento y control de producción, como se muestra en Figura 4.9 (JRI, 2018). El sistema de control y operación de los LHD estará compuesto por gabinetes de PLC asociados a cada estación de operación proyectada en sala de control secundaria y en el CIO Rancagua.



Figura 4.9: Esquema del sistema de control del Proyecto Andesita

Todos los equipos LHD se conectarán entre sí a través de la Red Integrada de Supervisión y Control (RISC) proyectada para el Proyecto Andesita. La RISC proyectada será una plataforma de red inalámbrica que operará sobre una arquitectura centralizada de manera jerárquica para la gestión y administración de los dispositivos de red inalámbrica, Wireless LAN controller (WLC), el cual realiza las tareas de centralización, configuración y administración.

Para situaciones de emergencia se activará un sistema de seguridad que detenga de inmediato la operación de los equipos que estén operando en la zona afectada. Lo mismo debe ocurrir para el caso de una falla de un equipo o del sistema de seguridad para el control de acceso.

4.2.3 Sistema gestión de la producción

La arquitectura del sistema de control producción mina está formada por equipos e instrumentos distribuidos en terreno y montados en los LHD, los que están comunicados con las estaciones de operación en la sala de control secundaria, en Barrio Cívico, y el Centro Integrado de Operación (CIO), ubicado en Rancagua.

Respecto a los instrumentos distribuidos en terreno, éstos corresponden a TAGs RFID (identificación por radiofrecuencia), los cuales se encuentran desplegados en el Nivel de Producción, específicamente en zanjas del polígono de explotación, zonas de registro y Estaciones de Vaciado; mientras que los equipos montados en los LHD corresponden a un computador a bordo, una pantalla táctil y sistemas lectores de TAG RFID. La Figura 4.10 muestra el esquema del sistema de producción para el Proyecto Andesita (JRI, 2018).

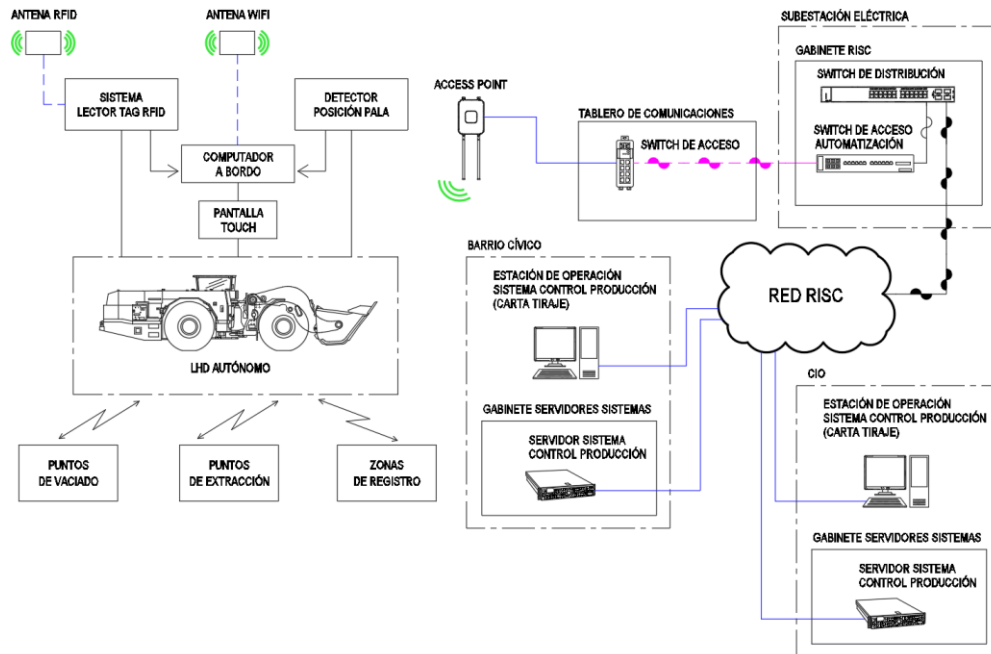


Figura 4.10: Esquema del sistema gestión de la producción del Proyecto Andesita

El sistema de control de producción mina permite controlar, gestionar y monitorear el proceso de extracción de mineral realizado por los LHD. Este proceso es realizado por medio de una carta de tiraje, la cual es cargada al sistema LHD autónomo, y, a su vez, éste la transmite a los demás sistemas involucrados en el proceso productivo. Esta carta de tiraje define las zanjas y puntos de vaciado en las cuales los equipos LHD extraerán y descargarán mineral durante el turno o día.

La información generada respecto a la ubicación de los LHD, es procesada por el computador a bordo del equipo LHD, para luego ser transmitida mediante comunicación inalámbrica (WIFI) hasta los Access Point conectados a los tableros de comunicación.

Se emplea un sistema de control capaz de operar en forma integrada con otros sistemas

4.2.4 Sistema de confinamiento

El sistema de confinamiento tiene como función principal evitar el ingreso no autorizado de equipos operados manualmente y de personas a la zona de operación de equipos LHD autónomos, como también evitar que estos equipos salgan de la zona autónoma sin la autorización del operador de la sala de control (JRI, 2018).

En este caso, el sistema de confinamiento considera barreras de control de tres tipos:

- Barreras duras: Las barreras duras corresponden a puertas o portones de operación manual. Estos deben contar con sensores de posición para monitorear el estado de cada puerta o portón, chapas eléctricas que impidan su apertura no autorizada y luces indicadoras del estado de operación.
- Barreras automáticas: Las barreras automáticas corresponden a puertas o portones de operación automática, accionados por medio de un sistema motriz. Estos cuentan con sensores de posición para monitorear el estado de cada puerta o portón.
- Barreras lógicas: Las barreras lógicas se utilizan para segregación operacional de los LHD y se basan en sistemas fotoeléctricos multifaz y estarán formadas por un dispositivo transmisor y un receptor de señales. La barrera lógica es el elemento de detección automática del ingreso de un equipo a la zona de registro, la que mediante sensores envía una señal al gabinete de control, el cual transmite a través de la RISC la información a la sala de control.

Ahora bien, el sector que se encuentre fuera de la zona de la zona automatizada corresponde a un confinamiento perimetral o exterior y segregará una zona de operación manual con una zona de operación autónoma. Por cada acceso se utilizará una barrera dura y una barrera lógica, las que se mantendrán normalmente cerradas mientras se encuentren equipos operando en modo autónomo.

Para el Proyecto Andesita la barrera de confinamiento exterior, será una puerta que permite a un equipo LHD con operador a bordo ingresar a la zona de registro, para proceder a su ingreso al sistema autónomo, como también permite la salida de un equipo que se encuentra detenido y para que sea sacado del sistema autónomo.

Para situaciones de emergencia, estas las barreras siempre pueden ser operadas localmente, pero esto deshabilita el funcionamiento de los enclavamientos de seguridad, deteniendo la operación de los equipos autónomos.

Por su parte, para la zona interior automatizada, las barreras de confinamiento interior se utilizan para restringir el acceso a personas o equipos manuales a una fracción del área autónoma, durante la operación en modo autónomo de los LHD en el resto del área, permitiendo así asegurar la independencia de la operación autónoma de los LHD con las áreas de operación manual.

Las barreras de confinamiento interior lo conforman una barrera automática más una barrera lógica, o bien, solo una barrera lógica. Estas barreras estarán normalmente abiertas cuando los equipos estén operando dentro del área autónoma.

4.2.5 Red WIFI

Para el Proyecto Andesita se proyecta que los LHD operarán normalmente en forma Autónoma, comunicados con la red de control por medio de red inalámbrica a través del estándar WIFI IEEE 802.11n, operando en la frecuencia de 2,4 GHz. Eventualmente los equipos podrán operar en forma manual o en forma remota desde sala de control ubicada en CIO Rancagua o desde sala de control secundaria (JRI, 2018).

Para iluminar con señal WIFI el área operacional, se proyectan Access Point (AP) con antenas direccionales y omnidireccionales para dar cobertura a todos los sectores donde operarán los LHD. Los AP serán conectados a los *switches* de acceso del sistema de CCTV de procesos, proyectado para la zona de producción.

La red WIFI de procesos proyectada para la zona de producción del Proyecto Andesita, será la encargada de iluminar con señal WIFI la zona de producción.

Los LHD autónomos estarán dotados de cuatro antenas, para comunicación con la red de control de procesos por medio de Access Point proyectados en terreno, los que serán conectados a *switch* de acceso pertenecientes al sistema de CCTV de proceso.

4.2.6 Sistemas *On Board*

El Proyecto Andesita considera la utilización de equipos LHD de operación autónoma para la extracción de mineral, por lo que requieren de sistemas *On Board*, para poder desplazarse al interior de la mina desde los puntos de carguío, hasta los puntos de vaciado de mineral (JRI, 2018).

Dentro del área de producción los LHD autónomos deberán interactuar por medio de sus sistemas de comunicaciones con sistemas de apoyo proyectados para el proceso de extracción y vaciado de mineral, como son ventilación, control de tráfico, telecomando martillos, entre otros, así como también operarán en forma conjunta con subsistemas propios para la operación autónoma de los LHD, como son Tracking, confinamiento y control producción.

Los LHD operarán en modo autónomo sólo al interior de la zona de producción autónoma, fuera de ella operarán en modo manual.

El esquema del sistema *On Board* se muestra en la Figura 4.11.

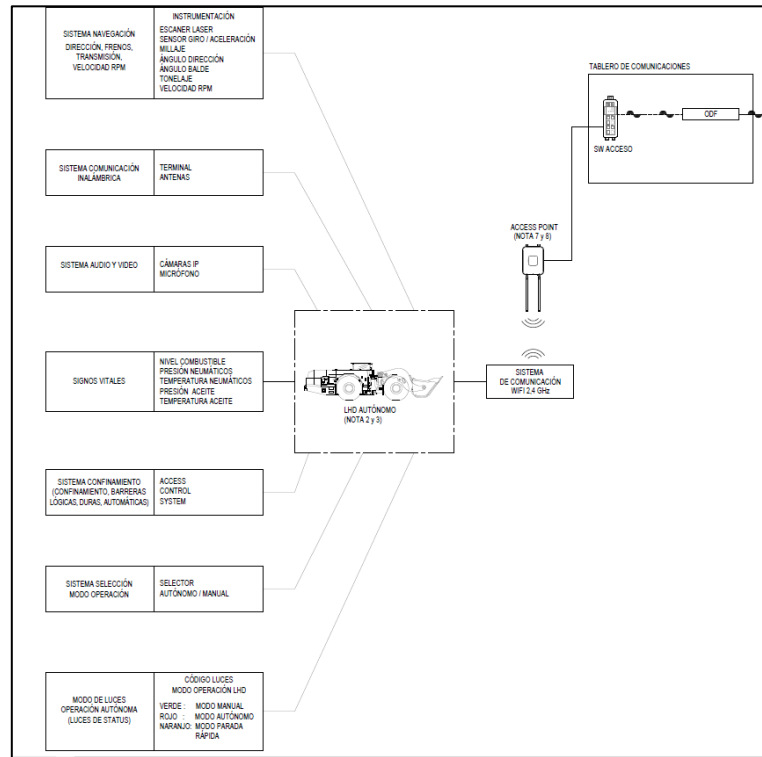


Figura 4.11: Esquema del sistema *On Board* de las palas del Proyecto Andesita

4.2.7 Zonas de registro

Las zonas de registro o puntos de registro, son zonas intermedias entre la zona de operación manual y la zona de producción autónoma. Esta actúa como frontera entre la zona manual y autónoma y es donde se produce el registro de un equipo LHD para ingresar a su lugar de trabajo, como también se produce el registro de salida de un equipo y así puede ser sacado de la zona autónoma. Este equipo es registrado con el motor detenido, y retirado en forma manual con la asistencia de un operador (JRI, 2018).

El proyecto contempla zonas de registro en los accesos al nivel de producción seis (6) zonas de registro para el sector Oeste y cinco (5) para el sector Este. En la Figura 4.12 se muestra a modo de ejemplo la ubicación de dos (2) zonas de registro (ZR) en el sector Oeste y en la Figura 4.13 los componentes de la zona de acceso y de registro.

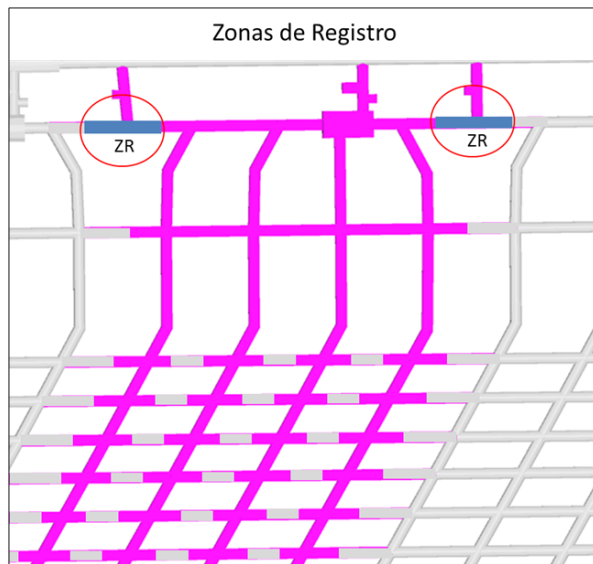


Figura 4.12: Zonas de registro

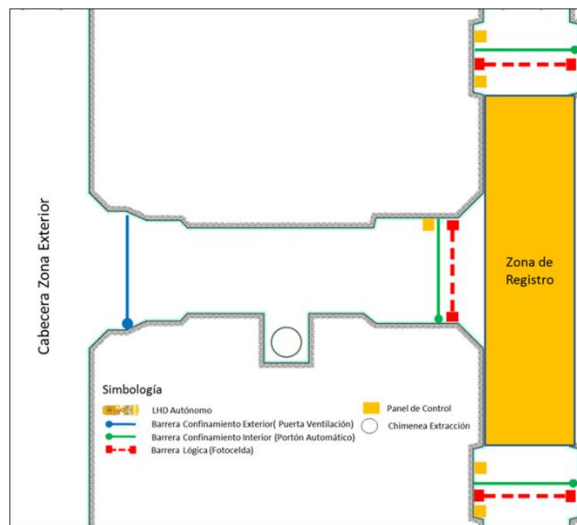


Figura 4.13: Componentes de zona de registro

4.3 CRITERIOS OPERACIONALES

4.3.1 Mantenibilidad y confiabilidad

Proyecto Andesita consideró dentro de sus diseños diferentes criterios que permiten y dan respuesta una buena implementación de la automatización en términos de la

mantenibilidad y confiabilidad, según se analizó en Capítulo 3. Los puntos más relevantes a mencionar son (JRI, 2018):

- Dimensiones de las galerías por las que se desplazan los equipos.

Las dimensiones de las calles, zanjas y rutas en general donde circulará el equipo LHD cumplen con la Norma Chilena (espacio libre de 0,5 m por cada lado) e incluso adicionan un poco más (0,62 m por cada costado), según se puede ver en Figura 4.14.

Asimismo, la entrada al punto de extracción cumple con el radio de curvatura requerido y permite al LHD cargar de manera recta.

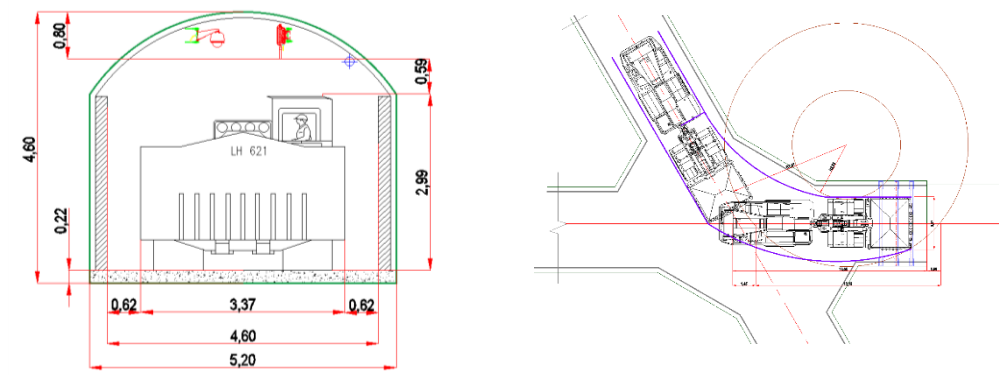


Figura 4.14: Dimensión de galerías y tamaño del equipo

La misma situación ocurre con las estaciones de vaciado, donde el vaciado pudiese hacerse simultáneamente desde los tres acceso que tiene, sin estorbar o generar un potencial accidente, según se puede observar en Figura 4.15.

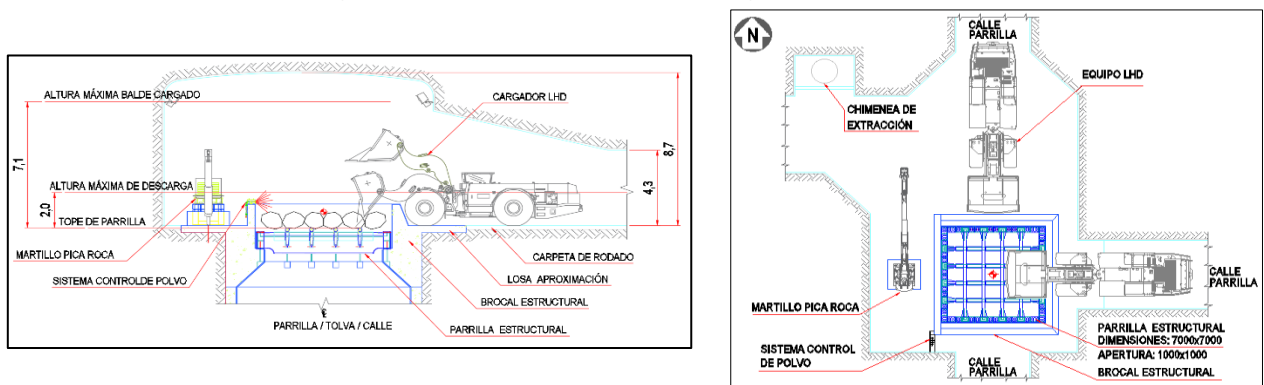


Figura 4.15: Dimensión de estación de vaciado y tamaño del equipo

Con todo esto se minimiza cualquier problema de accidente que las dimensiones exiguas pudiesen ocasionar al sistema autónomo producto, por ejemplo, de la velocidad y el vaivén propio de la carga y la inercia que genera mientras está en movimiento.

- Confinamiento del área en que opera el equipo.

El *layout* definido por el Proyecto Andesita es amigable desde el punto de vista del confinamiento de área automatizada y el requerimiento de acceder a áreas contiguas por alguna emergencia o necesidad.

Así por ejemplo, el proceso de mantenimiento programado de los equipos LHD se realiza en el taller de mantenimiento del proyecto, ubicado a un costado del Barrio Cívico. Para la mantención programada el equipo se dirige en modo automático a la zona de registro (ver Capítulo 4.2.7), cerrándose las barreras automáticas. Una vez segregada la zona de registro del resto del área confinada, se puede abrir barrera dura para que entre un operador se pueda llevar el equipo en modo manual al taller.

Terminado el proceso de mantención el LHD pasará por una zona de pruebas con características de zona autónoma y que se ubica en el taller de mantenimiento, para chequear el correcto funcionamiento del equipo, para que pueda ingresar a la zona de operación autónoma. Una vez chequeado el buen funcionamiento del equipo, un operador a bordo del LHD lo trasladará hasta la zona de registro para pasarlo a modo autónomo, a fin de que se integre al proceso operacional autónomo.

En la Figura 4.16 se muestra el traslado del equipo a la zona de registro, en la que el equipo pasa a modo manual y es llevado por un operador a la mantención requerida.

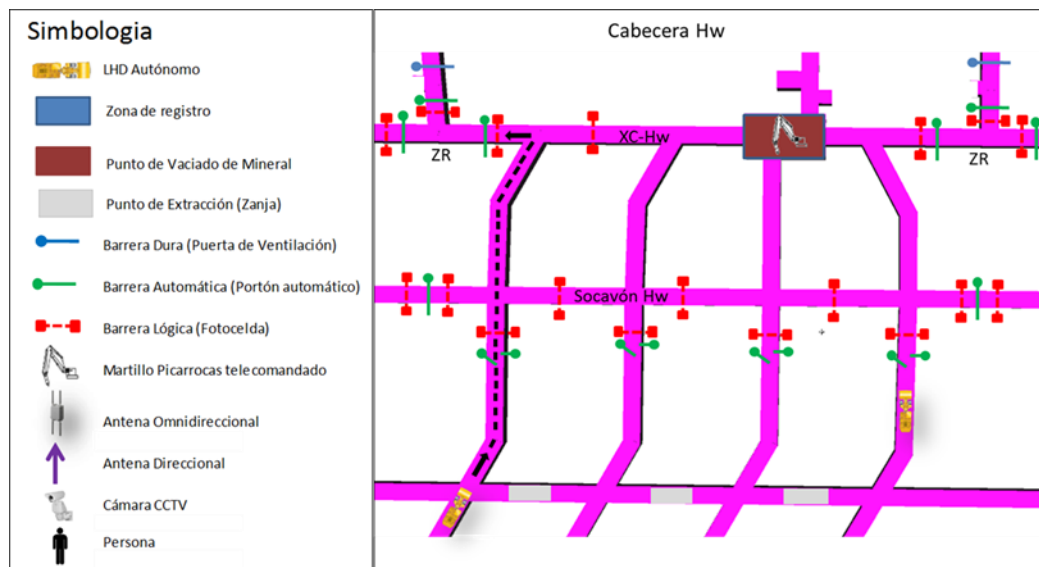


Figura 4.16: Traslado de equipo LHD a zona de registro

Todo este proceso no interfiere ni tampoco altera el normal funcionamiento de los equipos que trabajen otras calles.

En la eventualidad que se presente una falla del sistema LHD y que no pueda moverse hasta la zona de registro y deba ser remolcado y sacado de la zona de operación autónoma y llevado a taller, como también que el sistema falle por quedar fuera de servicio el sistema autónomo; en ambos casos de falla el equipo debe ser sacado de la zona autónoma, desconfinando las semi-calles y la zona del socavón que corresponda hasta llegar a la zona de registro.

En la Figura 4.17 se muestra la salida del equipo en caso de una falla, destacándose que tampoco significa detener o interferir calles aledañas que se encuentren en producción.

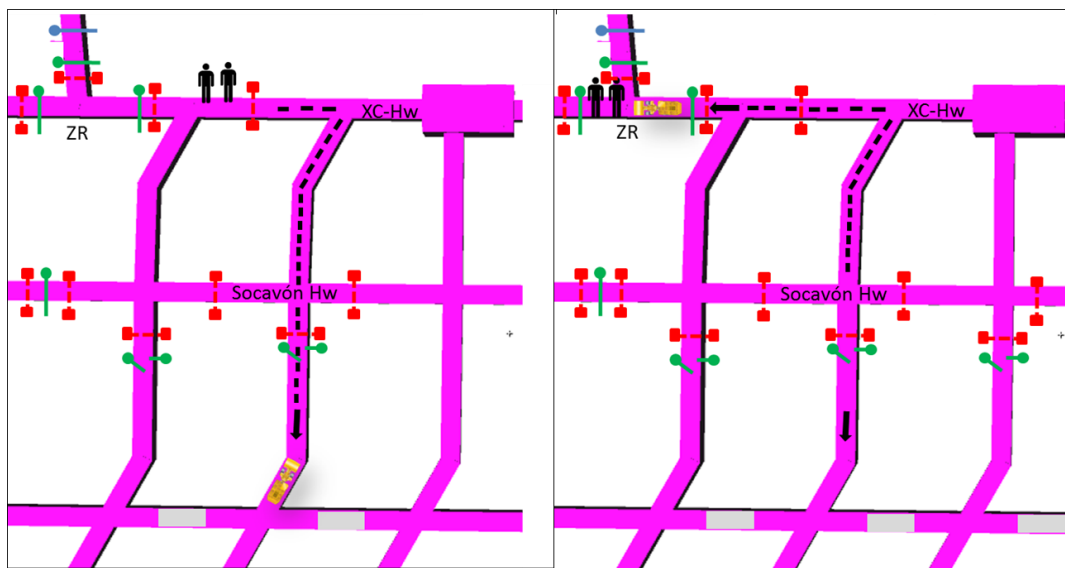


Figura 4.17: Falla del sistema LHD

- Control de derrames y limpieza de calles.

Para el control de derrames y control de limpieza, el sistema de automatización del proyecto considera que el equipo autónomo limpie periódicamente. Esta actividad la define el operador desde la sala de control y el equipo LHD la realiza en forma telecomandada apoyado por cámaras que el equipo tiene a bordo.

Como los equipos cuentan con cámaras, y ante la eventualidad de rocas ubicadas en zona que no alcance a cubrir el LHD y que entorpezcan su operación o generen potencial daño a los neumáticos, se contará con equipos LHD manuales de menor tamaño (7 yd³) que limpiarán las calles.

4.3.2 Interferencias operacionales

En adición a lo señalado en el punto anterior, Proyecto Andesita también incorporó en su diseño opciones de estrategia para minimizar el impacto de las interferencias operaciones (JRI, 2018). Algunos ejemplos de esto son los siguientes:

- Acceso a área productiva.

Los equipos LHD ingresan a la zona de operación autónoma en modo manual con operador a bordo. Al abrir puerta de ventilación y barrera dura se cierran las barreras automáticas, segregando la zona de registro del resto del área confinada del *footprint*.

El LHD entra a la zona de registro, el operador se baja del equipo y sale del área por el acceso, cerrando barrera dura. La zona de registro queda sin presencia de personas y LHD entra en modo automático. Se abren las barreras automáticas y el equipo ingresa al sector productivo y se dirige a la calle o semi-calle de operación que le fue asignada para desarrollar su operación, tal como se muestra la Figura 4.18.

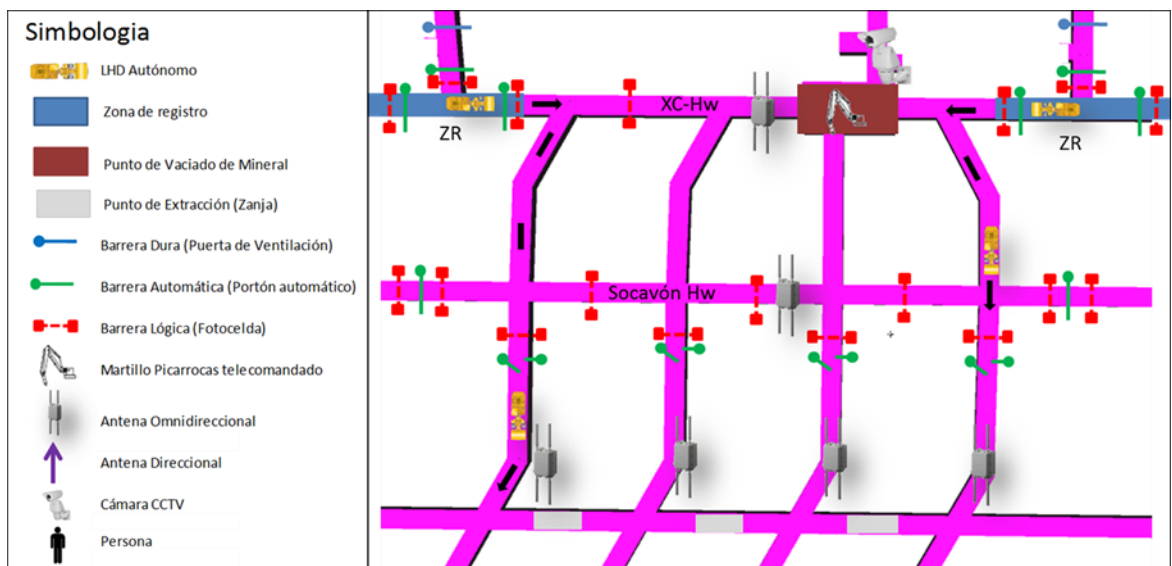


Figura 4.18: Ingreso de equipos LHD a las calles o semi-calles

En cada semi-calle operará un (1) equipo LHD con un máximo de dos (2) equipos por calle, el cual quedará confinado por indicación de la sala de control, mediante la acción de una barrera lógica y una barrera automática (portón automático), el cual se abre para el paso del equipo, ya sea ingresando o saliendo de la calle o semi-calle. El equipo realizará las tareas en forma independiente por lo que no existen interferencias con otros equipos. En la Figura 4.19 se muestra la operación de los LHD en las semi-calles.

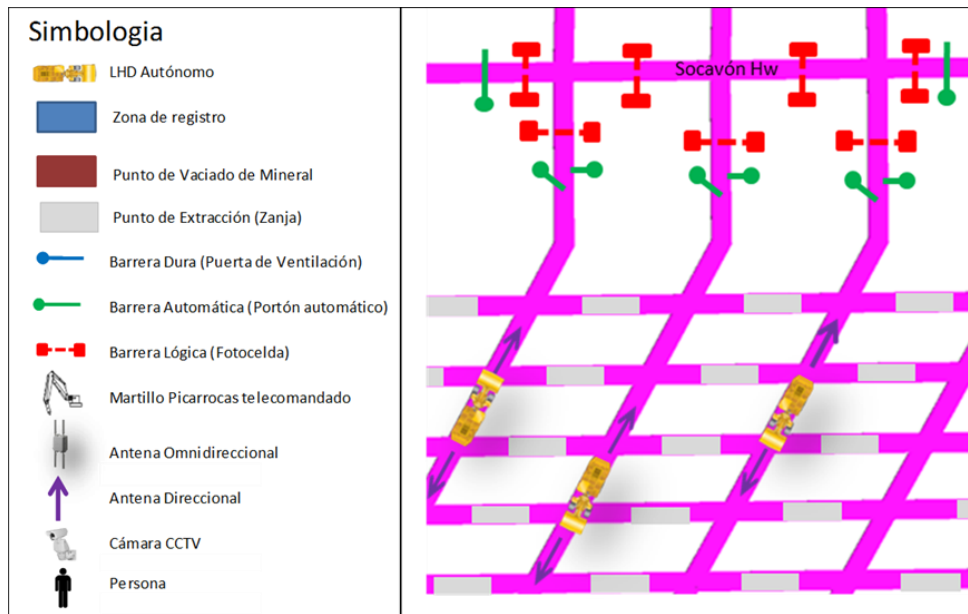


Figura 4.19: Operación de equipos LHD en las semi-calles

- Cambio de semi-calle.

La operación de cambio de semi-calle se realizará por el socavón interior, para lo cual la zona del socavón debe estar confinada y asegurada que no existan interferencias como presencia de personas ni equipos. Una vez verificado que todo está conforme, el operador asigna al equipo la nueva semi-calle y el LHD en forma autónoma se dirige al socavón correspondiente según sea el caso para realizar la maniobra de cambio de semi-calle. La operación de cambio de semi-calle se presenta en la Figura 4.20.

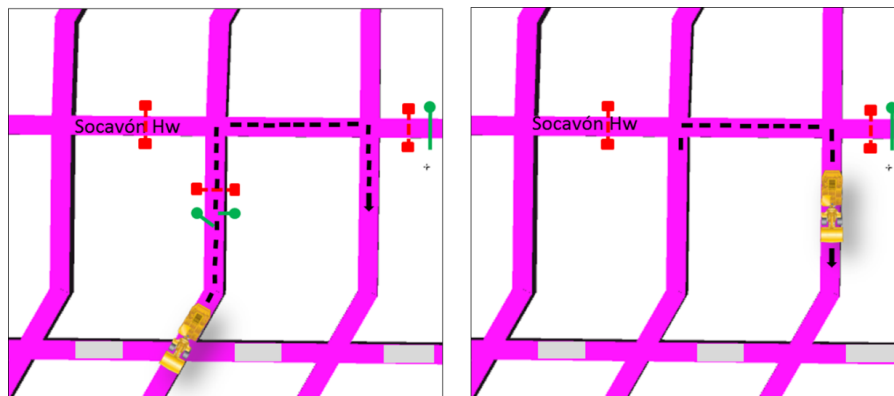


Figura 4.20: Cambio de semi-calle

- Inversión de equipos.

Las maniobras de inversión de los equipos LHD se realizarán en el socavón interior, tal como se muestra en la Figura 4.21. Esta inversión ayudará al equipo a siempre vaciar en la tolva con balde en punta.

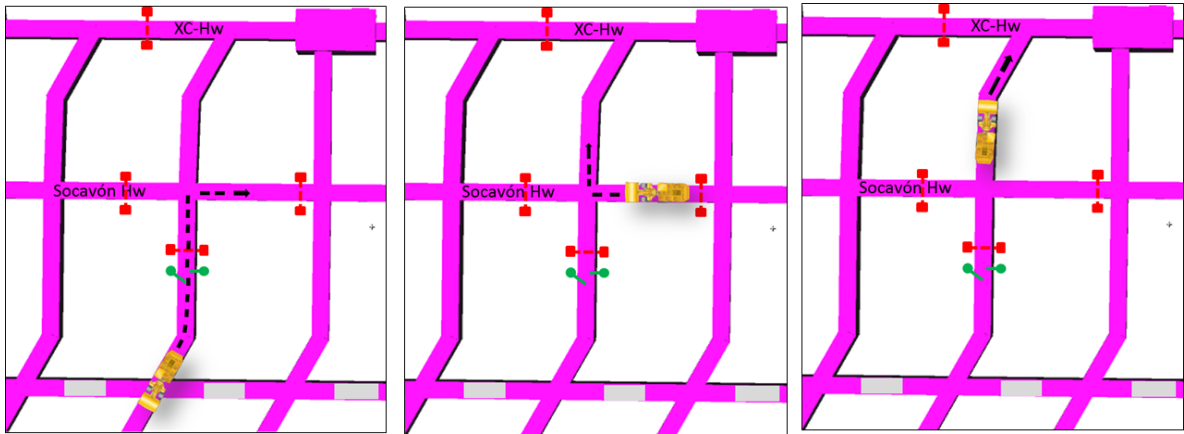


Figura 4.21: Inversión de equipos LHD

- Reducción secundaria.

Durante el proceso normal de operación de los LHD se producen interferencias con el ciclo productivo, siendo las más comunes las de reducción secundaria y las producidas por descolgadura.

Esta condición se detecta del centro de control con las cámaras que posee cada equipo LHD a bordo. Cuando el equipo no puede realizar el proceso de carguío por sobretamaño puede ser teleasistido y resolverse; y en caso contrario, se puede asignar a otro punto de extracción si existen suficientes en la calle o bien enviar a equipo a otra semi-calle para realizar la reducción secundaria. Para interferencias por descolgadura de roca se procede a cambiar equipo de punto de extracción o se envía a otra semi-calle.

La reducción secundaria es la actividad que tiene como objetivo el tronar el sobre tamaño que aparece en los puntos de extracción. El procedimiento indica paralización de actividades en la semi-calle con el problema y evacuación en el entorno a los puntos de extracción afectados, ingreso de una cuadrilla de personal autorizado, carga de explosivos, evacuación de cuadrilla, tronadura, ventilación y chequeo de infraestructura.

El personal ingresará a la zona confinada por la zona de registro (galería de acceso) más cercana a la semi-calle, la que debe ser desconfinada. Una vez que la cuadrilla está en el interior de la semi-calle, ésta nuevamente se confina para que el entorno quede habilitado nuevamente.

- Carga de combustible.

El Proyecto Andesita contempla el abastecimiento de combustible de los equipos LHD en los lugares de trabajo, por medio de vehículo especial. Los lugares habilitados para reabastecimiento de combustible son las labores de acceso donde se posicionará el camión y la zona de registro donde se ubica el LHD.

El proceso de carguío de combustible de los equipos LHD será realizado por un camión surtidor de petróleo, en las zonas de abastecimiento indicadas, las cuales se encuentran acondicionadas para este proceso.

Para el abastecimiento de combustible el equipo en modo automático, se dirige a la zona de registro, cerrándose las barreras automáticas. Una vez segregada la zona de registro, del resto del área confinada, se puede abrir barrera dura, para que ingrese personal a reabastecer de combustible al equipo LHD. Una vez que se termina la operación de abastecimiento, operador de camión de reabastecimiento abandona la zona de registro y el equipo repite procedimiento de acceso al área confinada.

En la Figura 4.22 se muestra el recorrido del LHD hasta el lugar de carga de combustible y en la Figura 4.23 se muestra el camión petrolero y el equipo LHD listo para la carga de combustible.

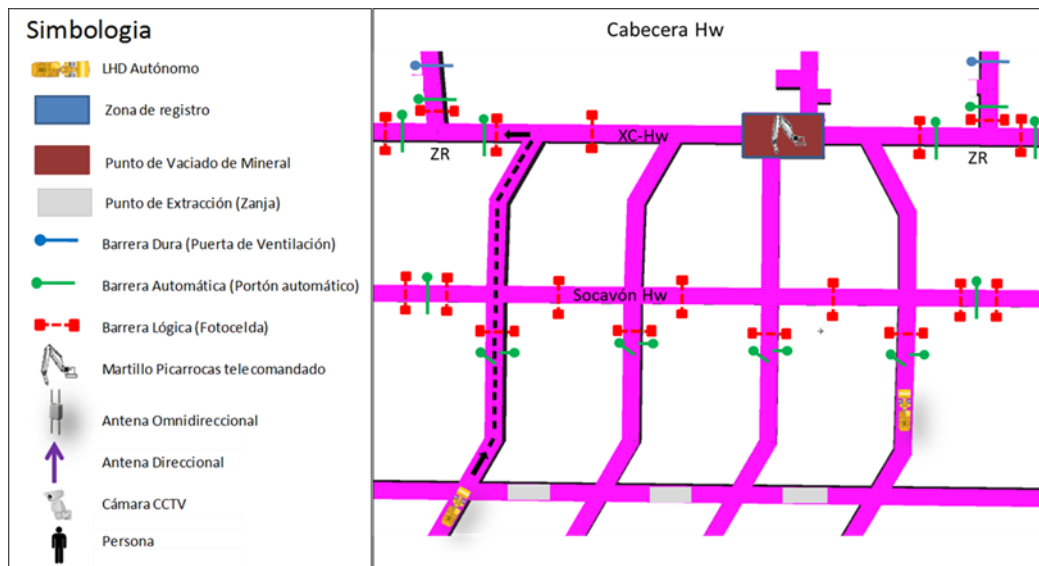


Figura 4.22: Recorrido de LHD para carga de combustible

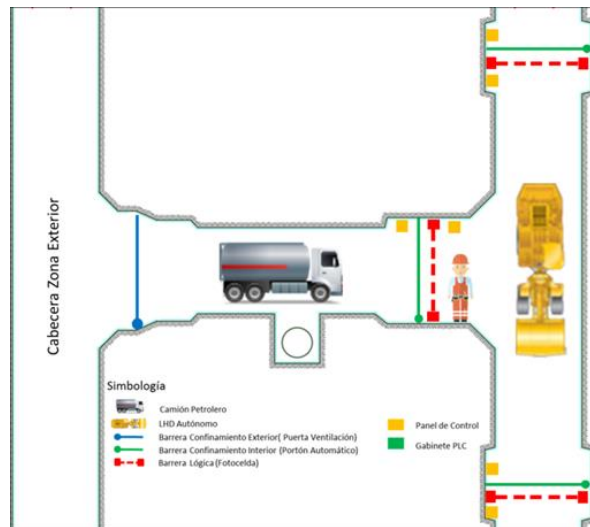


Figura 4.23: Carga de combustible equipo LHD

- Situación en caso de emergencia.

Para situaciones de emergencia como el caso de un incendio, se activará un sistema de seguridad que detenga de inmediato la operación de los equipos que estén operando en la zona afectada y activándose el sistema de control de puertas contra incendio, vías de evacuación, refugios contra incendio e isoestrategias de ventilación.

Para situaciones de emergencia como el caso de falla de equipos o del sistema de seguridad para el control de accesos, igualmente se activará el sistema de seguridad que detenga la operación de los equipos en la zona afectada.

Las puertas de confinamiento exterior de los accesos a las zonas de registro y las puertas automáticas ubicadas al interior del polígono de producción, siempre podrán ser operadas localmente, deshabilitando el funcionamiento de los enclavamientos de seguridad, deteniendo la operación de los equipos.

4.3.3 Actividades y requisitos de construcción

Para desarrollar las actividades de preparación y desarrollos se deben determinar accesos para personal y equipos y se deben separar las zonas de operación autónoma de las de operación manual, mediante confinamientos operacionales de tal manera que no interfieran entre sí (JRI, 2019).

Los confinamientos operacionales se utilizan para restringir el acceso de personas o equipos manuales a una fracción del área autónoma, durante la operación de modo

autónomo de los LHD en el resto del área, permitiendo así asegurar la independencia de la operación autónoma de los LHD con las áreas de operación manual. Estará formada por una barrera automática más una barrera lógica.

Para el proyecto Andesita para estas actividades se usarían las galerías de acceso que no sean parte del área confinada, tal como se muestra en la Figura 4.24, acceso que iría cambiando a medida que avance el desarrollo del proyecto.

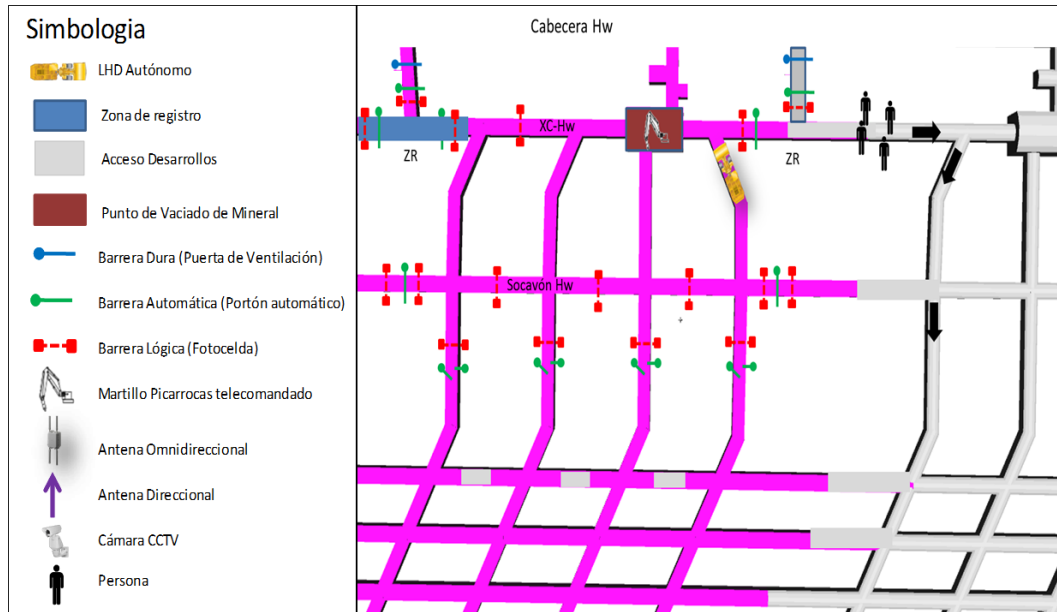


Figura 4.24: Preparación y desarrollos

4.3.4 Reglas operacionales

Las reglas operacionales a utilizar por el Proyecto Andesita son las mismas descritas en el Capítulo 3.3.4, las cuales son (JRI, 2018):

- El equipo LHD autónomo es asignado a la calle o semi-calle con menor cumplimiento dentro de las mismas disponibles.
- Una vez asignada una semi-calle o calle a un equipo LHD SA, este extrae el mineral de acuerdo al plan diario de extracción.
- El equipo LHD autónomo realiza la carga de mineral en forma tele-operada, completando el resto del ciclo, viaje, descarga y regreso en forma autónoma.

- Para la operación de carguío se solicita un tele-operador, si no existe alguno disponible, el LHD autónomo espera en la zanja hasta que se libere un tele-operador.
- Si se cuelga un punto de extracción, el equipo LHD autónomo cambia a la siguiente zanja con mineral programado en la calle o semi-calle. Si no encuentra otro punto para cargar, busca otra semi-calle o calle.
- Dentro del ciclo de extracción de mineral, antes de descargar el equipo LHD autónomo revisa primero que exista capacidad de vaciado y posteriormente que no se haya superado la capacidad de material sobre la parrilla,
- Si no existe capacidad de vaciado y/o no ha finalizado la operación de reducción de material de sobretamaño en parrilla, el equipo LHD autónomo espera cerca del punto de vaciado.
- Si hay capacidad de vaciado verifica si hay otro LHD descargando para evitar colisiones.
- Si la semi-calle donde está operando un equipo LHD autónomo queda fuera de operación por falla en el martillo, el equipo LHD busca otra calle o semi-calle que tenga martillo disponible.
- Si el equipo LHD autónomo no encuentra destino, espera hasta que haya nuevamente una calle o semi-calle disponible.
- Una vez que el equipo LHD SA ha recorrido todas las zanjas programadas en la semi-calle, busca otra semi-calle con mineral. La semi-calle actual pasa a colgada si tiene puntos colgados o a agotada en caso contrario.
- Si una semi-calle pasa a colgada, se solicita una cuadrilla de reducción secundaria la cual realiza el procesamiento de los puntos colgados.
- Si una cuadrilla de reducción secundaria requiere ingresar a una semi-calle, se detienen los equipos LHD SA en el entorno para dar paso a la cuadrilla, reanudando su operación una vez que la cuadrilla ha ingresado y se encuentre confinada en la semi-calle requerida.
- Una vez finalizado el proceso de reducción secundaria, en caso de haber mineral programado aun sin extraer en los puntos que fueron descolgados, la semi-calle queda disponible para operar, o en caso contrario, pasa a agotada.

- Al salir la cuadrilla de reducción secundaria desde a una semi-calle, se detienen los equipos LHD SA en el entorno para dar paso a la cuadrilla, reanudando su operación una vez que la cuadrilla ha salido por alguno de los accesos al nivel de producción.

4.4 DEFINICIÓN MÓDULO INICIAL DE OPERACIÓN

El diseño y configuración del nivel de producción del Proyecto Andesita se encuentra explicado a lo largo del Capítulo 4, caracterizándose por no tener puntos de vaciado en el interior del *footprint*, sino en la periferia, una malla de extracción de 17 m x 20 m, y palas de gran tamaño (10,7 m³).

Un punto importante para la definición del módulo inicial de operación es lo señalado en el Capítulo 3.3.3, en particular lo referente a los puntos de extracción habilitados, y que corresponde a la secuencia de incorporación de área respecto a la infraestructura mínima necesaria para definir este módulo (puntos de vaciado, en este caso).

La secuencia de incorporación de área del Proyecto Andesita se inicia en el extremo SW y se expande progresivamente en dirección NE, según se muestra en la Figura 4.25. La vida productiva del proyecto culmina el año 2041.

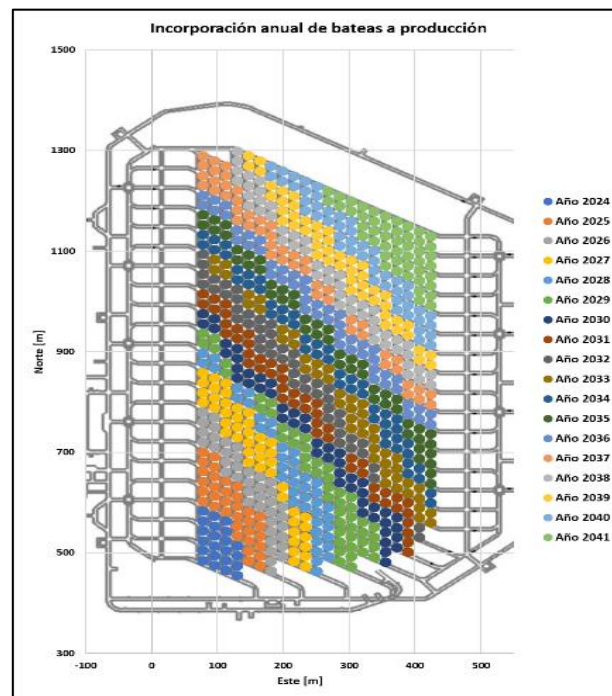


Figura 4.25: Secuencia de incorporación Proyecto Andesita.

En base a la secuencia de incorporación es posible observar que las primeras tolvas de vaciado en ser utilizadas corresponden a las del lado oeste, comenzando desde el que está ubicado más al sur del *footprint*.

En la Figura 4.26 y Figura 4.27 se muestra una recta imaginaria que divide al sector Andesita en dos mitades, bajo el concepto de semi-calle, donde se puede observar que la incorporación de los puntos de extracción habilitados del lado oeste “se alejan” del punto de vaciado, mientras que los del lado este “se acercan” al punto de vaciado (BCTEC, 2019).

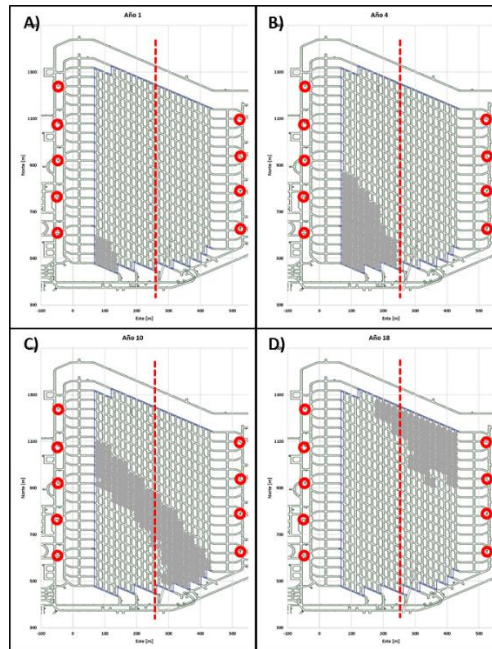


Figura 4.26: Secuencia incorporación de área Proyecto Andesita (años A) 2024; B) 2027; C) 2033; D) 2041)

En función de los antecedentes recopilados, se tiene que la automatización se realiza mediante módulos independientes, segregados mediante barreras duras (zona confinada) y con necesidad de infraestructura mínima para concretarlo. Proyecto Andesita también se encuentra dividido en nueve (9) módulos que permitirán una independencia en la operación para minimizar las interferencias operacionales descritas el Capítulo 4.3.2. Estos módulos consideran una (1) estación de vaciado, una zona de registro y las respectivas semi-calles que lo alimentan.

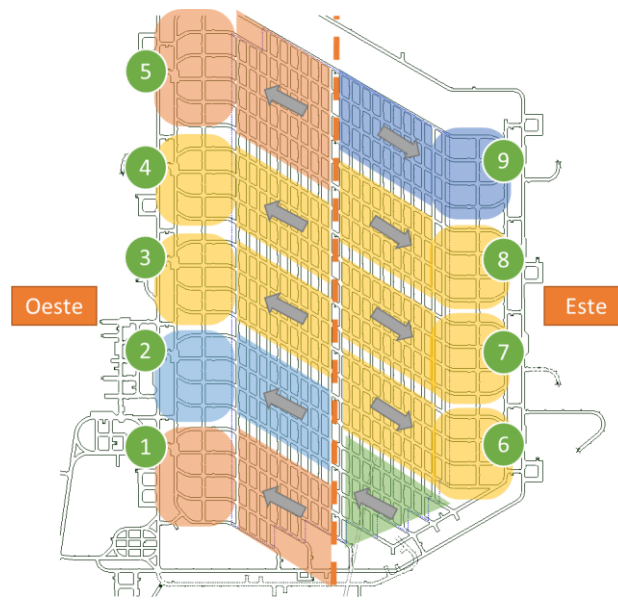


Figura 4.27: Subdivisión de calles y módulos de producción

Por lo anterior, al considerar los requerimientos para la automatización, se observa que es posible automatizar desde el lado oeste de la mina, una vez se hayan incorporado los primeros puntos de extracción pertenecientes a la semi-calle instalándose sistema de segregación móvil, y considerando que la ruta al punto de vaciado se encontrará construida y terminada con sus sistema de manejo de mineral habilitado, según se puede ver en Figura 4.28.

Por otra parte, para el lado este de la mina, será necesario esperar hasta acabar con toda la incorporación de la semi-calle respectiva, y con la tova y sistema de manejo de mineral construido. Lo anterior es para asegurar una zona confinada de extracción para los equipos LHD que además cuenten con una tolva de vaciado disponible (BCTEC, 2019).

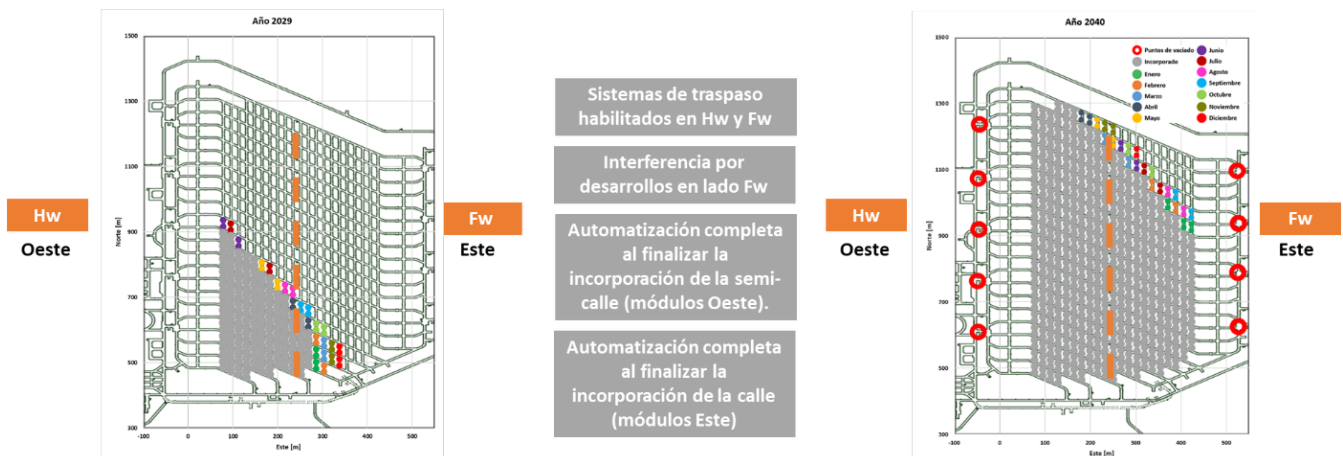


Figura 4.28: Secuencia de incorporación y su impacto en automatización

Dado el carácter de proyecto -operación con Panel Caving Convencional- y a pesar de la independización mediante módulos (confinamiento de área, semi-calles) en el proceso de extracción autónomo, se espera que existan interferencias operacionales similares en naturaleza a las de un LHD manual. Sin embargo, la minimización de estas interferencias fue abordada en el Capítulo 4.3.2.

Por lo tanto, considerando la información recopilada, para definir cuándo es posible realizar extracción de mineral en el Proyecto Andesita mediante sistemas autónomos se proponen criterios mínimos para su aplicación, según se desglosa en la siguiente tabla.

Tabla 4-1: Definición de módulo inicial de operación. Proyecto Andesita

| DISEÑO | CRITERIO |
|----------------------------------|--|
| Minería | Terminada y con fortificación definitiva instalada |
| Calles | Infraestructura civil construida, en particular carpeta de rodado instalada en toda la trayectoria de los LHD. |
| Puntos de extracción habilitados | Para las semi-calles del oeste puede ser desde los primeros dos (2) punto de extracción habilitado. Para las semi-calles del este, debe estar incorporada toda la semi-calle. |
| Sistemas de traspaso | Mínimo uno (1), terminado, construido y habilitado. |
| Suministros | Instalados en terreno (agua, electricidad, otros). |
| Sistema de automatización | Instalados (terreno, barreras duras y lógicas, equipo y sala de control). 1 operador por tres (3) equipos. |

Por lo tanto, y considerando la secuencia de la Figura 4.25, los módulos se irán incorporando a una extracción autónoma en las fechas en que se cumpla con los criterios definidos con anterioridad, con lo que se determinan las posibles fechas en las cuales podría comenzar la automatización, enumeradas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Automatización de módulos

| Módulo | Fecha automatización módulo |
|--------|-----------------------------|
| 1 | Julio 2027 |
| 2 | Noviembre 2028 |
| 3 | Agosto 2031 |
| 4 | Febrero 2035 |
| 5 | Septiembre 2038 |
| 6 | Enero 2034 |
| 7 | Enero 2036 |
| 8 | Enero 2040 |
| 9 | Enero 2041 |

Un punto importante a considerar al momento de automatizar en Proyecto Andesita dice relación con la convivencia entre una calle con extracción automatizada y una calle aledaña que no se encuentre automatizada, como por ejemplo la actividad de retiro de esponjamiento luego que tronar una batea. En este caso la configuración del *layout* permite la independencia en el tránsito del equipo automatizado sin interactuar con otros equipos, tal como se muestra en la Figura 4.29 (BCTEC, 2019). Esto enfatiza el hecho de la necesidad de contar con zonas aisladas exclusivas para la automatización y que el diseño considere esta variable.

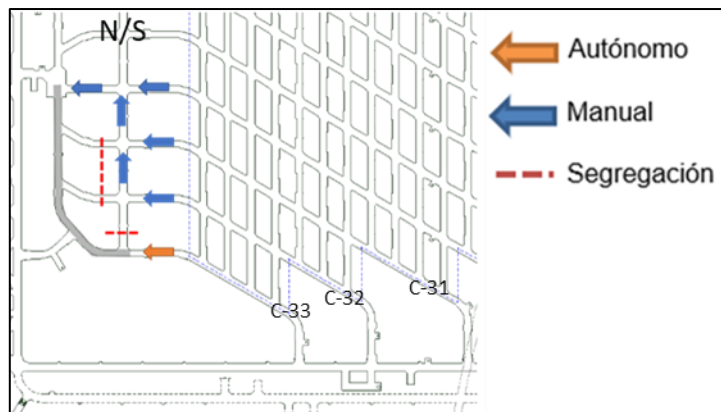


Figura 4.29: Configuración primera calle automatizada y calle aledañas no automatizadas

Un caso particular dice relación con los puntos de extracción que se encuentran en la zona divisional de las semi-calles (BCTEC, 2019). Para poder realizar extracción de puntos que se ven afectados a esta singularidad se tiene considerado realizar la instalación de un par de barreras que permitan realizar las maniobras a LHD para cubrirlos (Figura 4.30).

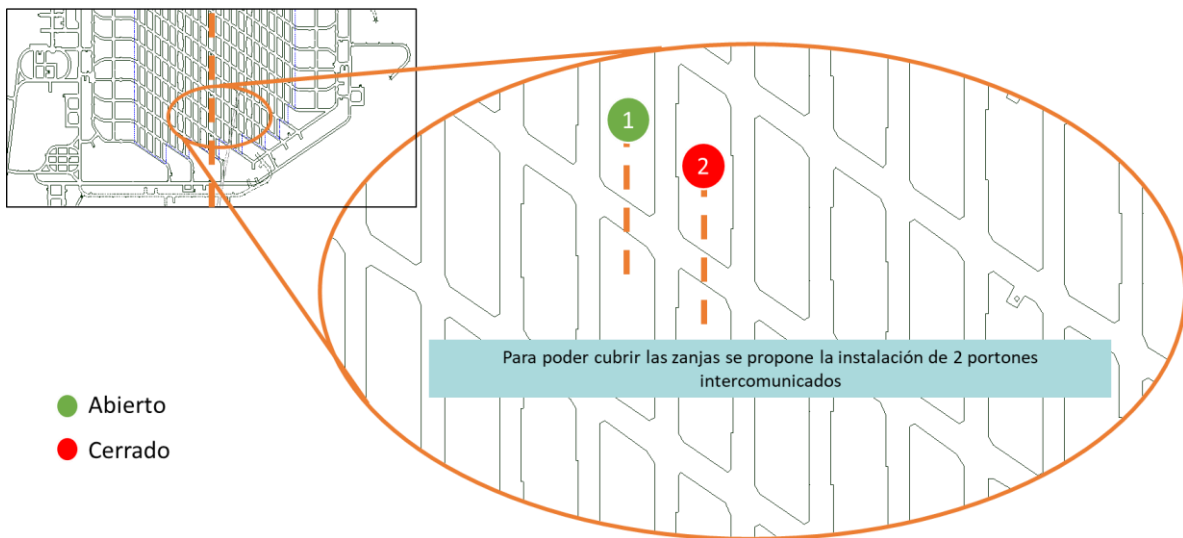


Figura 4.30: Configuración barreras en zona divisional de semi-calles

En Figura 4.31 y Figura 4.32 , se aprecia como la instalación adicional de barreras en la calle permite la extracción de mineral de las zanjas restringidas por la división original.

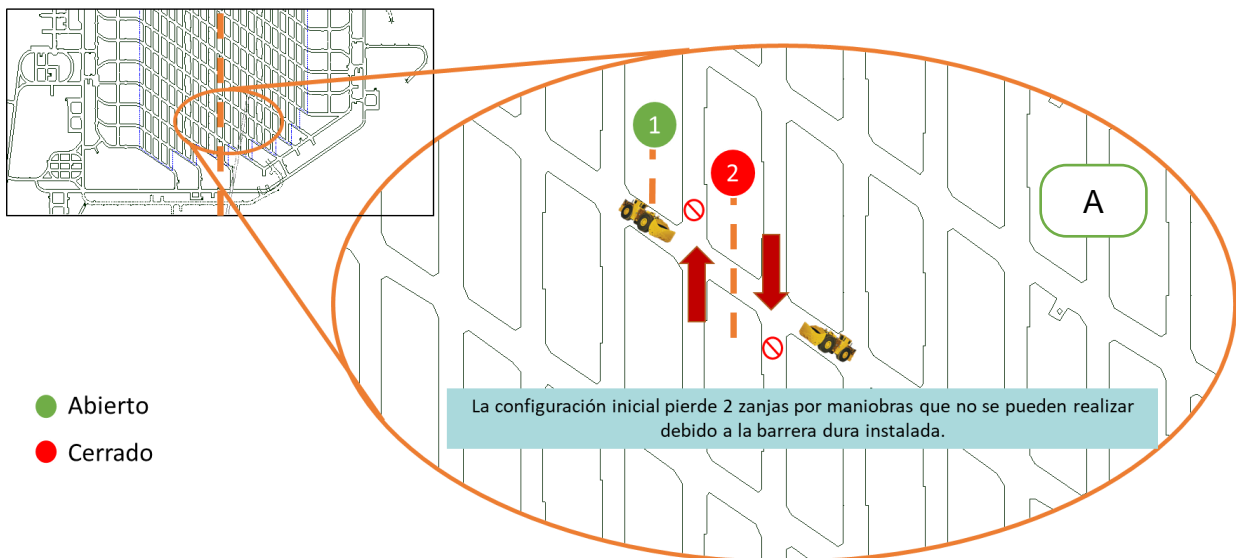


Figura 4.31: Esquema de extracción con barrera oeste abierta

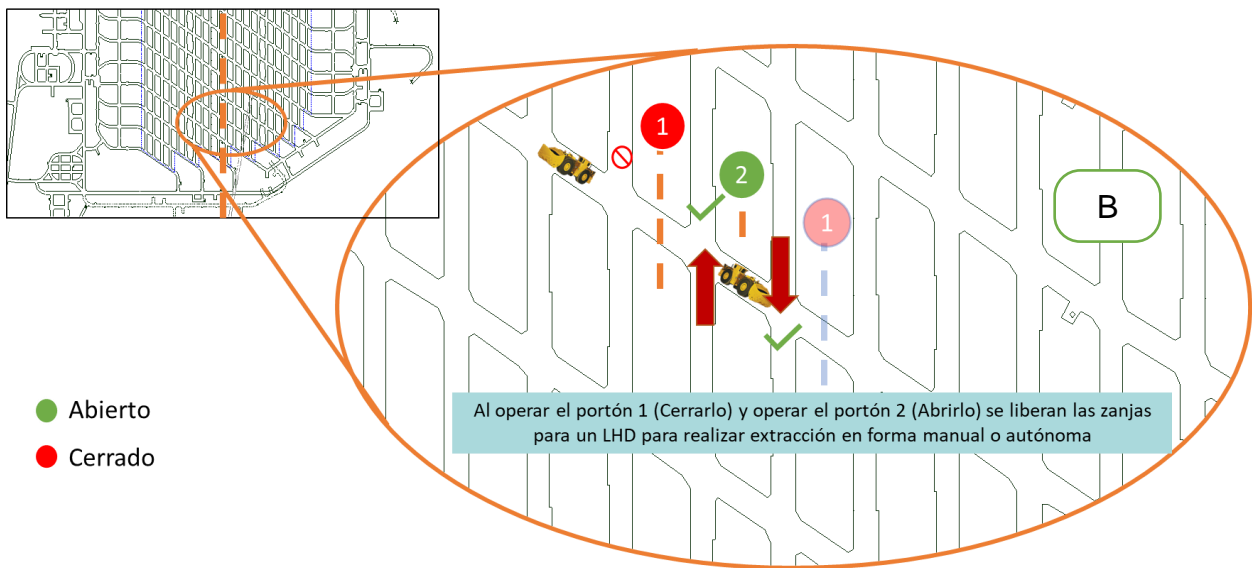


Figura 4.32: Esquema de extracción con barrera este abierta

Con esta configuración de barreras permite que ningún punto de extracción del *layout* quede sin producción, bajo una configuración de dos (2) palas operando en cada calle.

5 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Sobre la base del estudio realizado que incluyó un benchmarking de tecnología de automatización en equipos LHD de las principales faenas mineras del mundo y nacionales, se concluye que para efectos de minimizar las interferencias y maximizar los tiempos de utilización de los equipos automatizados, lo importante es definir módulos de operación, dentro de los cuales los equipos tendrán una configuración independiente del resto de las tareas o actividades de la mina.

Del mismo modo, para las minas en desarrollo y construcción, importante es definir un módulo inicial de operación que dé inicio tempranamente a la operación automatizada, con los consiguientes beneficios que ésta significa en términos de seguridad y productividad.

Todos estos módulos -y en general el diseño- deben considerar diferentes factores técnicos y operacionales que permitan cumplir con lo anteriormente descrito.

- Criterios técnicos:

Los más relevantes a considerar -y que deben estar implementados al momento de materializar el módulo inicial de operación- los siguientes:

- Sala de control. Debe contar con una sala de operaciones remota que controla y dirige las actividades de la automatización de los equipos en terreno. Muchas faenas cuentan con una sala secundaria en interior mina con el objeto de apoyar el comisionamiento, actividades de mantenimiento y contingencia operacional.
- Sistemas de control. Conjunto de equipos, instrumentos y elementos que ejecutan funciones automáticas de control y monitoreo de variables de proceso.
- Sistema gestión de la producción. Realiza la recopilación y gestión de información relacionada con el manejo de material, gestión del turno y gestión de la flota.
- Sistema de confinamiento. Segrega las zonas en las que operarán los LHD autónomos y restringen el acceso de otros equipos o personas a dichas zonas de producción.

- Red WIFI. Transmite la información y datos entre el equipo y el sistema de control.
- Sistemas *On Board*. Permiten a los LHD operar de forma completamente autónoma sin que sea necesario el apoyo de un operador. Están formado por subsistemas de navegación, equipos de comunicación inalámbrica, audio y video, monitoreo de signos vitales del LHD, sistema de confinamiento, selección de modo de operación y modo luces.
- Zonas de registro. Zonas donde se realizan el cambio de modo de operación (manual a autónoma, y viceversa), segregadas por medio de barreras físicas (portones) y barreras lógicas.

- Criterios operacionales:

Dentro de los criterios técnicos a considerar en el diseño global (minero y de automatización) del módulo inicial de operación, se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Mantenibilidad y confiabilidad de los equipos. El diseño debe tomar en cuenta las dimensiones de las galerías por las que se desplazan, el área a confinar los equipos, y el control de derrame y limpieza de calles, con el objeto de minimizar la mantención correctiva de los equipos.
- Interferencias operacionales. El diseño debe, de algún u otra forma, eliminar o minimizar la ocurrencia o impacto de interferencias operacionales sobre el tiempo efectivo de operación de los LHD, entre los que se destacan: reducción secundaria, mediciones geomecánicas, mantención de infraestructura, muestreos y abastecimiento de combustible.
- Actividades y requisitos de construcción. Debe convivir con actividades de desarrollo y construcción del resto de la mina, como así también contar con la infraestructura completamente construida en el área que se va a operar con palas autónomas. Se debe considerar la minería, las calles, sistema de traspaso, puntos de extracción habilitados, suministros, sistema de automatización.

Un resumen de las actividades y requisitos de construcción en el diseño de la automatización se desglosa en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Definición de módulo inicial de automatización

| DISEÑO | CRITERIO |
|----------------------------------|--|
| Minería | Terminada y con fortificación definitiva instalada |
| Calles | Infraestructura civil construida, en particular carpeta de rodado instalada en toda la trayectoria de los LHD. |
| Puntos de extracción habilitados | Mínimo uno (1), pero dependerá de las definiciones de cada proyecto basados en la programación de obras requeridas, distancias de seguridad con otras actividades, e incorporación de área v/s punto de vaciado. |
| Sistemas de traspaso | Mínimo uno (1), terminado, construido y habilitado. |
| Suministros | Instalados en terreno. |
| Sistema de automatización | Instalados (terreno, barreras duras y lógicas, equipo y sala de control). |

- Reglas operacionales. Para la programación de la automatización se deben considerar una serie de reglas que dan cumplimiento al programa productivo de un turno y que los equipos LHD operen de forma continua y minimizar interrupciones.

Estas reglas dicen relación con la configuración y programación del sistema y la manera lógica que enfrenta las diferentes actividades o situaciones.

5.2 TRABAJO FUTURO

Los desafíos futuros en términos de automatización abren una ventana amplia de oportunidades para aplicarlos en minería subterránea. Si bien es cierto las compañías mineras no avanzan a la misma velocidad que el resto de la industria, la automatización ha evidenciado un gran adelanto en los últimos 20 años. Sin embargo, aún queda mucho por hacer e implementar.

Un punto relevante será la automatización global del sistema desde la tronadura de socavación hasta el vaciado en planta. Muchas de estas actividades aún se hacen de manera manual y poco o muy poco se ha avanzado en tecnología o automatización de éstos.

Sumado a lo anterior, un desafío continuo que se ha establecido junto a la automatización es la reticencia de los operadores ante la tecnología, ya sea por desconocimiento o por temor a perder sus puestos laborales, siendo visto como una amenaza y no como una oportunidad de mejorar su calidad de vida.

Por último, los próximos pasos será extender este estudio a otras actividades y definir - vía prototipos e implementación en terreno- la automatización de alguno de los proceso actualmente realizados exclusivamente por operadores en terreno. También será interesante analizar distintos procesos con distintos tipos de objetivos o configuración en la automatización y cómo se entrelazan, como por ejemplo el caso visto en este estudio (p alas) y su conexión con el trasporte principal.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] BCTEC, 2019. Benchmarking Equipos Autónomos LHD y Camiones, Estudios Complementarios Proyecto Diamante Andesita.
- [2] BCTEC, 2019. Informe Final Benchmarking Tecnológico LHD. Estudios Complementarios Proyecto Diamante Andesita.
- [3] BCTEC, 2019. Informe Inicial Análisis Operacional Andesita. Estudios Complementarios Proyecto Diamante Andesita.
- [4] Codelco, 2007. Informe Interno. Post Evaluación Proceso de Extracción con LHD Semiautomático Sectores Pipa Norte & Diablo Regimiento.
- [5] Codelco, 2018. Presentación: Proyecto Explotación Andesita, División El Teniente.
- [6] Codelco, 2019. Informe Interno. Despliegue y Validación LHD SA Nivel Alfa, Mina Esmeralda.
- [7] Cronin, J., 2015. Northparkes – Underground Production automation.
- [8] Diseño AutoCad: Nivel de Producción Proyecto Andesita.
- [9] Danielsson, M., 2016. Borehole Dimension Impact on LHD Operation in Malmberget Mine, Degree Project. University of Lulea.
- [10] Fisher, B., et. Al., 2012. Autonomous and Remote Operation Technologies in the Mining Industry – Benefits and Costs. BAE research report.
- [11] Fowler, J., 2017. CMOC – Northparkes Mines 2017 Annual Review.
- [12] Gustafson, A., 2011. Automation of Load Haul Dump Machines –. Research Report, University of Lulea.
- [13] Gustafson, A., 2013. Automation of Load Haul Dump Machines – Comparative Performance Analysis and Maintenance Modeling. Doctoral Thesis, University of Lulea.
- [14] Gustafson, A., et. Al., 2013. Production and maintenance performance análisis: manual versus semi-automatic LHDs.
- [15] JRI, 2019. Sistema Autónomo LHD. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [16] JRI, 2019. Informe Filosofía Operacional LHD. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [17] JRI, 2019. Análisis Operacional Andesita. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [18] JRI, 2018. Simulación Capacidad Productiva Integral del Proyecto Andesita. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.

- [19] JRI, 2018. Bases y Criterios de Diseño Automatización. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [20] JRI, 2018. Sistema Autónomo LHD Sistemas On Board. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [21] JRI, 2019. Sistema Autónomo LHD Confinamiento y Zonas de Registro. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [22] JRI, 2019. Explotación Andesita Teniente. Estudio de Factibilidad Proyecto Andesita.
- [23] JRI, 2018. Explotación Diamante Teniente. Ingeniería Básica Proyecto Diamante.
- [24] JRI, 2018. Estimación de Equipos Total Desarrollo y Construcción. Ingeniería Básica Proyecto Diamante.
- [25] JRI, 2018. Simulación de Producción Equipos LHD y Camión Autónomos. Ingeniería Básica Proyecto Diamante.
- [26] Marklund, S., 2017. The comparison of automatic and manual loading in an Underground mining environment. Degree Project, University of Lulea.
- [27] Reveco, A. 2014. Sistema de manejo de materiales en minería por hundimiento con fragmentación fina. Trabajo de Título. Universidad de Chile.
- [28] Riquelme, J. 2014. Fundamentos operacionales productivos y de automatización. Tesis de Magister. Universidad de Chile.
- [29] Roberts, J., et. Al., 2000. Autonomous Control of Underground Mining Vehicles using Reactive Navigation. Proceedings of the 2000 IEEE, International Conference on Robotics & Automation.
- [30] Schunnesson, H., et. Al., S/F. Performance of Automated LHD machines: A Review. Lulea University of Technology.
- [31] Shekhar, G., et. Al., 2017. Loading Procedure and Draw Control in LKAB's Sublevel Caving Mines – Baseline Mapping Report. Research Report, University of Lulea.
- [32] Sitio web: <https://www.symbio.com/success-story/sandvik/>.
- [33] Sitio web: CMO Northparkes - LHD Automation Presentation - Austmine _ Mining Equipment, Technology and Services (METS) Sector.
- [34] Sitio web: <https://www.home.sandvik/en/news-and-media/newslist/news/2013/06/keeping-safety-in-mine/>.
- [35] Sitio web: <http://www.northparkes.com/news/northparkes-driverless-trucks-head-deep-underground>.

- [36] Sitio web: <http://www.northparkes.com/news/new-block-cave-project-at-northparkes-mines>
- [37] Sitio web: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/automatizacion-mineria-del-futuro/>
- [38] SKM, 2001. Estudio Técnico Económico Equipos LHD Manual v/s LHD Semiautomático. Ingeniería Básica Proyecto Diablo Regimiento
- [39] Uribe, P. 2014. Análisis de la funcionalidad y desempeño de la operación semi-autónoma en equipos de carga, acarreo y descarga en minería subterránea. Tesis de Magister. Universidad de Chile.

ANEXO A: PRESENTACIÓN DE ESTE ESTUDIO EN MASSMIN2020

Semiautonomous LHD operational philosophy for panel caving applications

Semiautonomous LHD operational philosophy for panel caving applications

H Vega CODELCO, Chile

R Castro Universidad de Chile, Chile

Abstract

In the most recent years, there has been an increase in the number of caving operations are using or planning to use autonomous LHDs to extract the ore from drawpoints. There are several reasons to the adoption of this type of technology including health safety and productivity improvements. Currently operating caving mines that have adopted autonomous LHD uses the Block Caving method, where all development has been completed prior to production activities. Panel Caving is a method where the development and production activities have to be conducted simultaneously in a production drive. In this article, the Semiautonomous LHD Operational Philosophy (SLOP) for the application of autonomous LHDs for a panel caving operation is proposed. The SLOP considers aspects such as the technology requirements, the material handling design and the production plan to successfully apply the technology to panel caving operations. Finally, a case study of the application to the SLOP for Andesita Mine at El Teniente is presented.

1 Introduction

Automation is one of the most important keys in underground mines in order to improve safety and productivity. In terms of safety, it is eliminates the operator's exposure to any uncontrolled or risky situation in an underground environment (Uribe 2014). Tele remote operations from a Control Room located on surface have been the solution worldwide, implemented in operations such as Freeport Indonesia (DOZ, GBC and DMLZ), LKAB (Kiruna), Northparkes and CODELCO (Andina and El Teniente). Through automation these mines have not only ensured the safety of operators but also improved their quality of life.

The main scope of automation in productivity has been to avoid complex and repetitive activities. The implementation of technology has resulted in higher productivity and effective operating time and as a result lower operating costs. An example of repetitive activities are train automated operations implemented in GBC, Kiruna and El Teniente; where the dispatch system controls train speed, point machines, safety distances, optimized tramming routes, amongst others (Shekhar 2017).

In terms of underground production equipment, LHDs (Load Haul Dump) are very common in both Block and Panel Caving mines. Semiautonomous LHDs has been implemented and operated since 2004 in Pipa Norte and Diablo Regimiento mines (El Teniente) with good results along the life of those mines (Codelco 2007). Northparkes is another example of a good Semiautonomous LHDs implementation (Vega 2020).

It is worth noting that for the cases described above, the automation had been implemented in Block Caving mine scenario, which means with the panels were already fully developed and constructed before the commencement of automation, to avoiding any human-LHDs interaction.

Panel Caving mines are different as construction coexists with production and this interaction in most of the cases is unavoidable. Therefore the challenge is to define an area with the minimum of infrastructure requirements in order to start with the automation in Panel Caving mines, taking into account that construction and production activities that coexist in the same panel or vicinity. This is called Initial

Production Module (IPM) and will be the focus of this study. In addition to the IPM, the automation technical and layout criteria will be part of the analysis (Vega 2020).

2 Technical criteria in the automation design

The automation design for the IPM needs to include the following topics (Gustafson 2013; Riquelme 2014; JRI 2019a; JRI 2019b; BCTEC 2019):

- Local and international normative. It is important for the traceability of the implementation of the system.
- Control Room. Centralized and gather the information in order to control and dispatch the equipment. Usually the main Control Room is located on surface regards better quality of life. In addition of this, most of the mines have a secondary Control Room in underground close to the production area that is used for emergency cases, commissioning period of time or maintenance purposes.
- Control systems. Give support to the production and the equipment. It is composed by many devices that control, manage and guide the semiautonomous equipment in order to achieve the production goals, not only in terms of tons but minimize the corrective maintenance and improve safety operation as well.
- Production management system. Production schedule in Panel Caving mines is key in order to have a normal caving condition and to avoid any geotechnical issues, early dilution or cave back singularity. Semiautonomous LHD gives the chances to fully accomplish the caving and production rules and be embedded into their operating philosophy.
- Confinement system. Isolate the semiautonomous LHDs in order to avoid any interaction with people or other equipment that may cause a potential accident. Physical or logical control gates are needed to achieve this. The first one are focused on people or equipment and prevent the access to the isolated area, and are operated from the Control Room. The logical control gates help and control the interaction between semiautonomous equipment within the isolated area.
- WiFi network. Connects all the underground mobile and fixed equipment with the control room. Helps for the communication between the on board LHD system and the Access Points (wireless network device). Receives and sends data to the Control Room in real time.
- On Board systems. Read the status of the LHD and send the information to the Control Room. On the other hand, received the information from the Control Room and follow the instructions. On board systems let the LHD to have semiautonomous operation (no operator is needed), and have devices that control navigation, wireless communication, maintenance indicators, audio and video, among others.
- Register zones. LHDs operate semiautonomous in an isolate production area and on manual with an operator on board when out of the isolated production area. For the transition or interface between these two areas, the register zones are needed. They are usually located close to the production area and physical gates and help to isolate the change of operation methodology.

Figure 1 shows how the automation systems are connected from the Control Room (that could be on surface or UG) to the LHD in operation through a communication network.

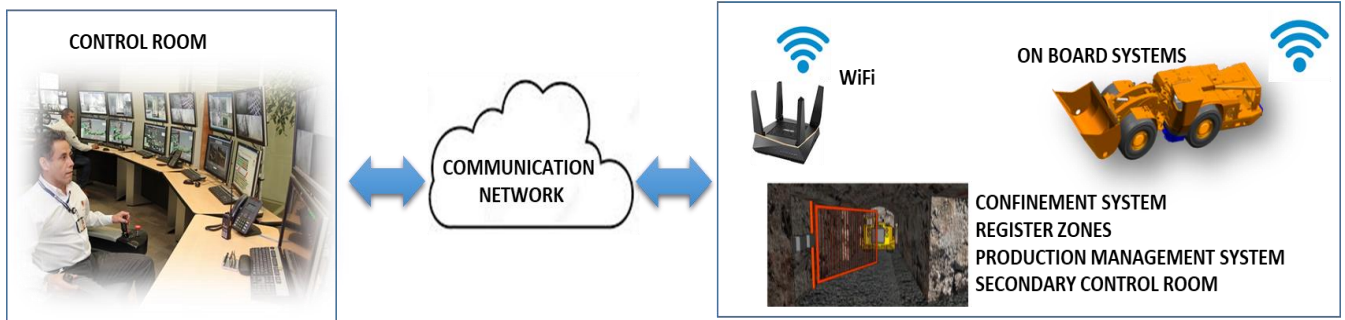


Figure 1 Automation Control System configuration

3 Layout criteria in the automation design

IPM configuration that incorporates geotechnical recommendations needs some criteria to avoid any issue in the future with the automation. The main topics to be considered are (Vega 2020; BCTEC 2019):

- Panel clearance. The panels design must be wide enough in order to avoid any sensor triggered by proximity or collision to the walls. This will make the LHD to stop for safety reasons or in the worst case damage to the equipment. A minimum of 0.5 m clearance from the suspended services such as water, compressed air, power, which might give a false collision alarm.

At the same time, to have a good and simple confinement design is important to minimize interference with any external task with the production semiautonomous LHDs. For instance, geological or geotech field inspection may stop only (if any) the semiautonomous LHD located in the panel to be checked and not the whole Extraction Level.

Finally, keep clean the panels along the way of the semiautonomous LHD is key to avoid any collision to the chassis or axles with the spillage coming out of the drawpoints.

- Operational interferences. There are many sources of interferences that the design must take into account in order to minimize the impact of them over the LHD productivity. Some of these are: secondary blasting, geological or geotech field inspections, infrastructure maintenance, refuelling, among others.
- Construction requirements. These are some of the requirements that the IPM needs to support the automation:
 - Mining and construction: All the areas where the semiautonomous LHD will operate must be complete in terms of ground support and construction (panels, drawpoints, walls, roadway, ventilation, etc.)
 - Mineral handling: All the mineral handling system regarding the drawpoints available must be finished (dumping points, grizzlies, rock breakers, etc.)
 - Drawpoints available: The number of drawpoints needed for the IPM in a panel varies depending on the drawbells opening sequence and the location of the dumping point. If the sequence goes towards the dumping point then the automation cannot be implemented in the panel until the sequence pass through the dumping point because of construction activities are still in progress between the last drawpoint on production and the dumping point, so this area cannot be fully isolated for automation purposes. Still can coexist interaction between automated loaders with people or other machines.

On the other hand, if the sequence goes away from the dumping point then the automation can be implemented in a panel starting from one or two drawbells. This is possible due to the area between the last drawpoint on production and the dumping point can be isolated

for automation purposes. The constructions activities are taking place out of this isolated area.

Figure 2 shows the idea of this sequence explanation and the dumping point location.

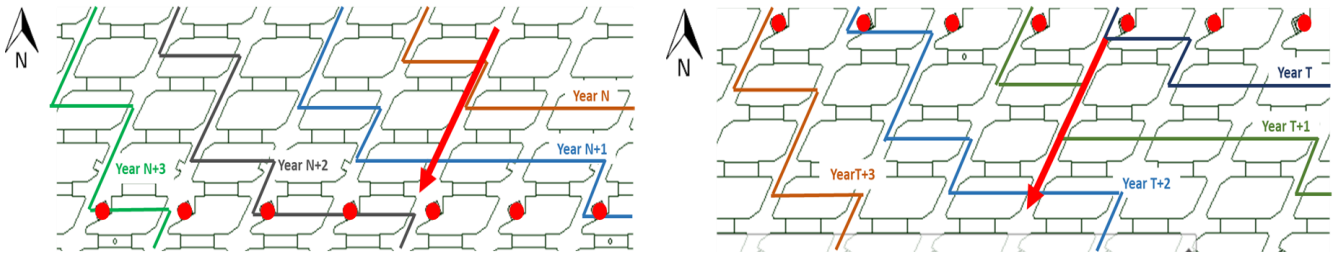


Figure 2 Drawbell opening sequence and dumping point location

In both cases the first two rules described in this chapter have to be obeyed.

- Services: All the supplies have to be installed and operating before automation starts (water, compressed air, energy).
- Semiautonomous system: All the technical criteria and devices described above has to be installed previously
- Operational rules: In order to coordinate and manage the LHD fleet, operational rules must be followed. The rules varies from mine to mine or design but in general they are focused on LHD assignments, draw control, coordination between different activities, etc.

4 Initial production module (IPM) philosophy

All the inputs described before in terms of technical and layout criteria depend on each mine configuration but -as a brief summary- the minimum required for the IPM are described in Table 1 (Vega 2020; BCTEC 2019).

Table 1 Minimum requirements for the IPM

| Design | Criteria |
|-------------------------|---|
| Mining and construction | Tunnels and infrastructure (walls, drawpoints, roadway, etc.) along the semiautonomous LHD operates have to be completely finished with permanent ground support. |
| Drawpoints available | Minimum one (1) but will depends on the strategy of each project/mine in terms of drawpoint opening sequence, safety distances and the dumping point location. |
| Mineral handling system | Minimum one (1) finished and ready for operation. |
| Services | Completely installed. |
| Automation system | Finished in the confinement area (field devices, gates, on board systems) and Control Room. |

5 An automation design: Andesita Project

Andesita Project is currently one of the most important projects for El Teniente Division (CODELCO) and will start production at the end of 2023. It will be a Conventional Panel Caving with hydraulic preconditioning and a peak of production of 25 ktpd with 18 years of life of mine. The footprint area will be roughly 250,000 m² (JRI 2019c; JRI 2019e).

The mineral handling configuration will have semiautonomous LHDs in the Extraction Level dumping into one out of nine ore bins located outside the footprint. The main Haulage Level with trains, located 30 m below, will take the production out to the plant (JRI 2019e).

Figure 3 shows the Extraction Level configuration and the 23 panels this project will have (Codelco 2018).

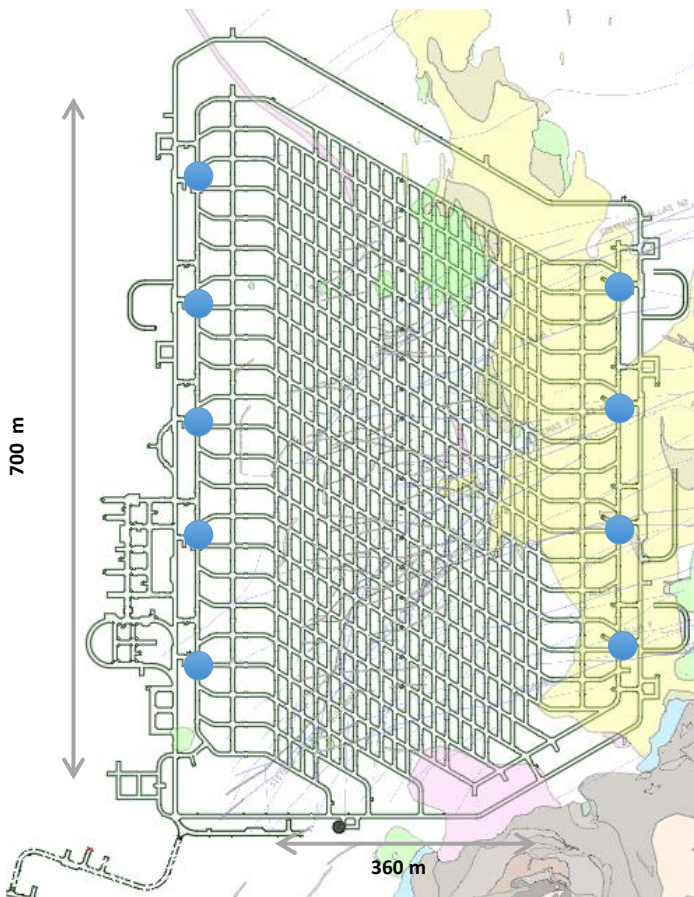


Figure 3 Extraction Level of Andesita Project and the location of the dumping points

Dumping points will be an ore bin located out of the footprint area with an opening of 7×7 m, a grizzly of 1×1 m configuration and a rock breaker for oversize. Each dumping point will have three accesses and offer the ability to dump three LHDs at the same time (JRI 2018a; JRI 2018b; JRI 2019e).

5.1 Technical criteria

LHDs will be semiautonomous and loading from drawpoints will be tele-remote operated from the Control Room located in Rancagua, 50 km distance. The operator will be able to handle up to 3 LHDs because of haulage distances (average of 170 m roughly, one way).

At the same time the project will have a secondary Control Room located in its fixed facilities in the Extraction Level for equipment and systems commissioning, maintenance or backup for emergency cases; and will be 30% of the main Control Room capacity (JRI 2018b; JRI 2019a).

Even though Andesita Project will include all the items described in Chapter 2, it is important to mention two important topics:

- Confinement system

The Project will install physical and logical gates that completely isolate the areas where the LHDs will operate and avoiding any interaction with other operation or people. Figure 4 shows where the gates are located with respect to the dumping point and register zone (RZ). In green color are the physical gates, and in red are the logical ones.

It is important to mention that along the panels these gates can be relocated once a new drawpoint is added to the production program. It means they are not fixed. (JRI 2019d; Vega 2020).

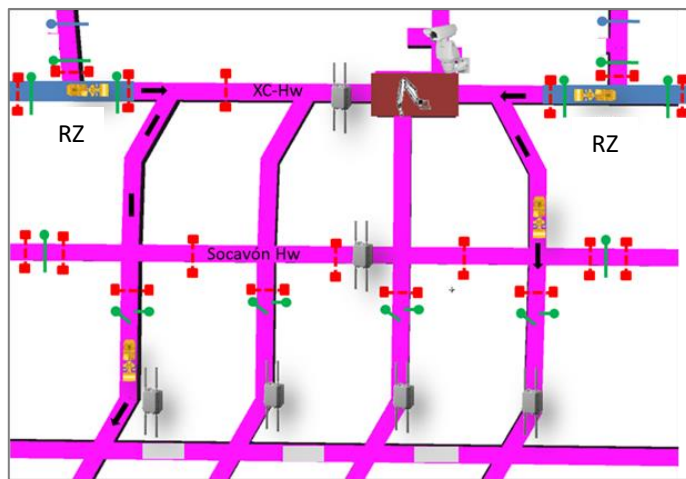


Figure 4 Confinement gates distribution

- Register Zones (RZ)

The project consider a strategic location for the RZ (Figure 5). All of them close to the dumping point and will never interrupt LHDs in production activities. It is not needed to stop any loader in order to add a new semiautonomous LHD to the production activity.

In addition of this, each of the RZ will be a local refuelling area for LHDs. So for this activity it is not needed an operator to drive the LHD to the refuelling station and back to the production area. All will be in situ in the footprint area (JRI 2019d; Vega 2020).

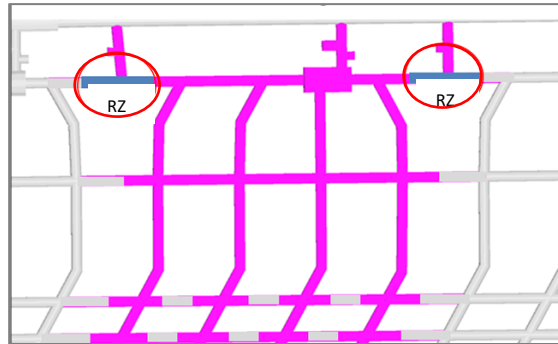


Figure 5 Register zone

5.2 Layout criteria

Extraction Level will have panels wide enough for make easier the semiautonomous production activity (4.6 × 4.5 m, W × H, free area). These dimensions minimize any collision to the walls because of the LHD movements.

All the activities the LHD needs to do in terms of production will be done completely automated and isolated in the footprint area, from refuelling up to panel relocation. No operator on board is needed (JRI 2019b).

For maintenance purpose, an operator on board is needed and will take the LHD from the RZ to the workshop area, and vice versa.

As it is a Panel Caving mine, the construction operators can access to the Extraction Level through the RZ and will not interrupt the production activity as it is shown in Figure 6.

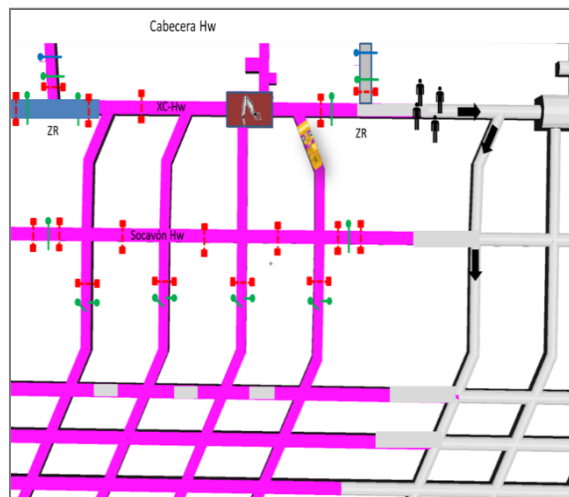


Figure 6 Construction activities access to the Extraction Level

The design is friendly to different activities and lets them coexist while taking into account safety restrictions and the company rules. As a brief summary, the design took into account the following topics (Vega 2020):

- Suitable panel and dumping point dimensions.
- Well defined and safety confinement areas.

- Easy access for different activities.
- Strategic RZ location.
- Straightforward operational management (LHD relocation, secondary blasting, refueling, spillage cleaning, emergency cases).

5.3 Andesita IPM

The Extraction Level footprint layout will be divided into ten (10) different production areas as it is shown in Figure 7, and will have one dumping point for each of them, except the area at the Southeast that have to dump to the West just to avoid any bottle neck in the dumping point of the Southeast. At the same time, each panel will be divided into two (2): East semi-panel and West semi-panel (JRI 2019b).

When taking the production sequence into account, the IPM for the Andesita Project will be defined depending on the philosophy described in Figure 2 and Table 1. For the dumping points located at the West it is recommended to have at least the first two (2) drawpoints ready for production in each semi-panel, with a minimum safety distance of 100 m from construction activities in the same panel.

For the dumping points at the East is different. Due to construction activity goes towards the dumping point, it is needed to have the whole semi-panel already constructed and finished (Vega 2020)

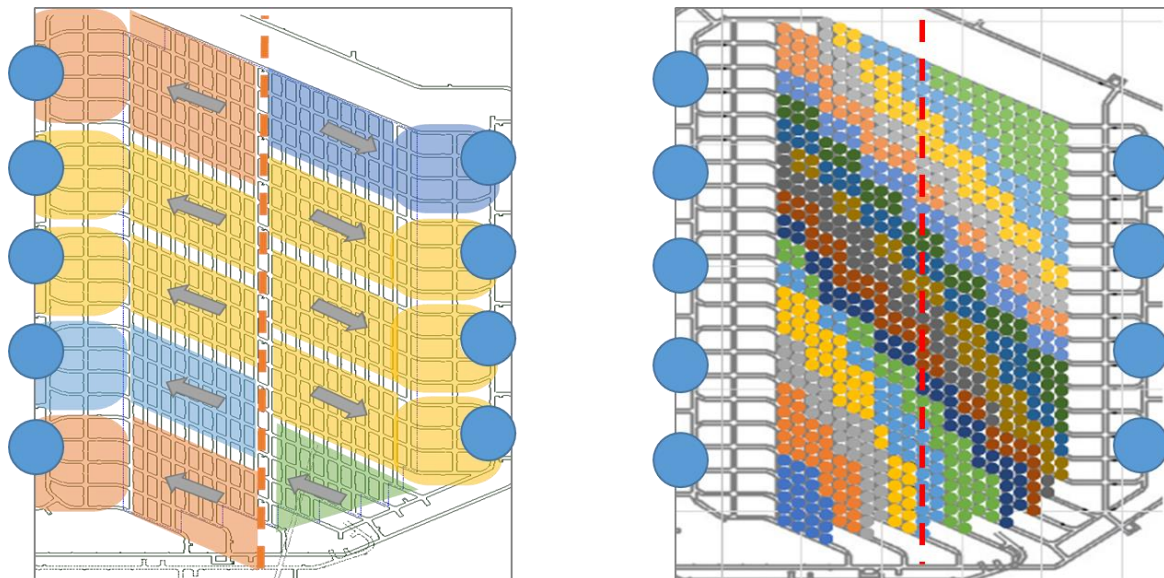


Figure 7 Extraction Level configuration, construction direction and production sequence

The strategy for the IPM and the dumping point is shown in Figure 8, and the basic idea is to isolate the area where the semiautonomous LHD will operate. In this case the first panel (C-33) is the focus of the IPM. The whole access to the dumping point (dark gray color) is completely confined and no other equipment can access.

Other activities from other panels can continue with no interruption, even the mucking with operator on board can dump into the same dumping point but from different access. The layout design gives the chances to dump from other access and actually to other dumping point if it is needed (because of grizzly maintenance, for example) (Vega 2020; BCTEC 2019).

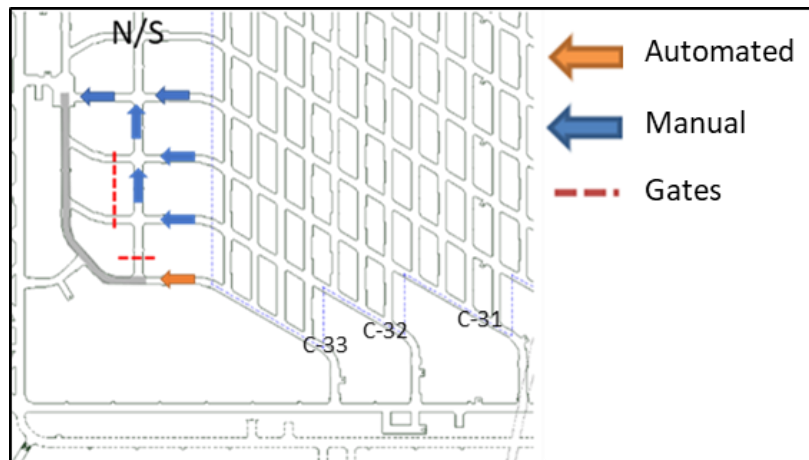


Figure 8 Strategy for the IPM

6 Conclusions

For semiautonomous LHD in Panel Caving mines, an IPM must be defined in order to start as early as possible with this application. Topics such as layout and technical criteria must be followed to facilitate the implementation. Even though both can be easily implemented in most designs, there are three main concepts that have to be reinforced:

User friendly design for all the production activities to minimize congestion and interruption.

All isolated production areas where the semiautonomous LHDs operate must be fully constructed.

Depending on the production sequence and the dumping point location, the IPM can bring forward the semiautonomous production activity initiation.

In the future the challenge in panel caving mines will be focused on how to match this technology (semiautonomous LHD) with other processes such as undercutting or haulage levels activities. Full autonomous mines is the goal.

Acknowledgement

The authors would like to thank to CODELCO for their assistance with the development of this work and for providing time and resources to complete this paper. Also would like to thank to BCTEC team for their support during the development of this study.

References

- BCTEC, 2019, 'Informe Inicial Análisis Operacional Andesita'. Complementary studies for Andesita Project.
- Codelco, 2007, 'Post Evaluación Proceso de Extracción con LHD Semiautomático Sectores Pipa Norte & Diablo Regimiento', internal report.
- Codelco, 2018, 'Proyecto Explotación Andesita, División El Teniente', presentation.
- Gustafson, A. 2013, 'Automation of Load Haul Dump Machines – Comparative Performance Analysis and Maintenance Modeling', PhD Thesis, University of Lulea, Lulea.
- JRI, 2018a, 'Simulación Capacidad Productiva Integral del Proyecto Andesita', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2018b, 'Bases y Criterios de Diseño Automatización', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2019a, 'Sistema Autónomo LHD', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2019b, 'Informe Filosofía Operacional LHD', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2019c, 'Análisis Operacional Andesita', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2019d, 'Sistema Autónomo LHD Confinamiento y Zonas de Registro', Andesita Project feasibility study.
- JRI, 2019e, 'Explotación Andesita Teniente', Andesita Project feasibility study.
- Riquelme, J. 2014, 'Fundamentos operacionales productivos y de automatización', MSc thesis, Universidad de Chile, Santiago.

- Shekhar, G. 2017, 'Loading Procedure and Draw Control in LKAB's Sublevel Caving Mines – Baseline Mapping Report', research report, University of Lulea, Lulea.
- Uribe, P. 2014, 'Análisis de la funcionalidad y desempeño de la operación semi-autónoma en equipos de carga, acarreo y descarga en minería subterránea', MSc Thesis, Universidad de Chile, Santiago.
- Vega, H. 2020, 'Metodología de automatización de LHD en minería del caving', MSc Thesis, Universidad de Chile, Santiago.