



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

CARGA AUTÓNOMA Y SU INSERCIÓN EN UN MODELO INTEGRAL DE
OPERACIÓN SUBTERRÁNEA PARA MÁQUINAS LHD

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA

CARLOS ANDRÉS TAMPIER COTORAS

PROFESOR GUÍA:
JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARCOS ORCHARD CONCHA
CARLOS MUÑOZ POBLETE

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magíster en Ciencias de la Ingeniería,
Mención Eléctrica
POR: Carlos Tampier Cotoras
FECHA: 30/09/2018
PROFESOR GUÍA: Javier Ruiz de Solar San Martín

CARGA AUTÓNOMA Y SU INSERCIÓN EN UN MODELO INTEGRAL DE OPERACIÓN SUBTERRÁNEA PARA MÁQUINAS LHD

La automatización en la minería subterránea es una tendencia que ha cobrado cada vez más importancia a lo largo de los años, debido a los notables riesgos que la operación manual supone para las personas y a las crecientes capacidades computacionales que el desarrollo tecnológico ha posibilitado. En el caso de las máquinas LHD, las tareas de transporte y descarga cuentan con solución autónoma en forma comercial, no así en el caso de la carga de mineral, etapa que aún se encuentra en desarrollo experimental.

El objetivo de este trabajo, enmarcado en el proyecto FONDEF IT16I10026 "Sistema de Carguío Autónomo para Cargadores Frontales de Bajo Perfil", es diseñar y validar un algoritmo de excavación de mineral con equipos LHD para minería subterránea, el cual se base en las técnicas aplicadas por operadores humanos, y adicionalmente considere las diferentes características, tareas, requisitos y dinámicas de la operación minera, que le permitan insertarse en un esquema integrado de operación automatizada. Para ello se lleva a cabo una profunda investigación acerca de las tareas de producción en minería subterránea, que consideran tanto revisión de la literatura, como entrevistas y conversaciones con operadores de máquinas LHD. Luego se desarrolla un algoritmo de carga autónoma, el cual es inicialmente probado en condiciones de laboratorio con prototipos a escala, para luego ser refinado y validado en un LHD en un ambiente de producción real de la mediana minería subterránea. Todo lo anterior, considerando una estructura de software de fácil integración con otras tareas y funcionalidades autónomas de la máquina que pudiesen no encontrarse disponibles en el momento.

Los resultados de validación, de los cuales sólo se pudieron obtener una acotada cantidad por la disponibilidad del LHD e infraestructura de la mina, muestran que el esquema de carga autónoma implementado permite llenar satisfactoriamente el balde de la máquina en la mayoría de los casos, en la medida que la configuración inicial de las articulaciones de dirección del vehículo y posición del balde sean cuidadosamente preparadas. Además, el algoritmo de excavación se gatilla correctamente en forma remota, luego de la conducción de la máquina, la cual puede ser autónoma o teleoperada, logrando una integración correcta de las etapas. La flexibilidad del esquema integral de operación también se demostró a través de otras funcionalidades, no críticas, definidas en el proceso de carga, pero no implementadas, las cuales no impactaron el funcionamiento básico del software.

Se concluye que el algoritmo de carga autónoma desarrollado cumple su objetivo de llenado del balde, pero se reconoce su sensibilidad a las condiciones iniciales, por lo que la automatización del posicionamiento previo a la carga se alza como la siguiente funcionalidad de mayor relevancia para asegurar el éxito de la maniobra.

Dedicatoria

A mis padres, por enseñarme el valor del estudio y el trabajo, así como la gratificación y enriquecimiento personal de empujar las fronteras del propio conocimiento.

A mi gran amor, Stefani Caorsi, por presionarme, empujarme, animarme y sobre todo acompañarme durante esta importante etapa.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a los proyectos FONDEF IT16I10026 "Sistema de Carguío Autónomo para Cargadores Frontales de Bajo Perfil" y Centro Basal FB0809 "Advanced Mining Technology Center" por financiar, acoger y propulsar esta Tesis de Magíster.

Un agradecimiento especial a las empresas GHH-Fahrzeuge y Compañía Minera San Gerónimo, quienes facilitaron maquinaria e infraestructura para llevar a cabo los desarrollos.

También quisiera agradecer a mis colegas y compañeros de trabajo del grupo de Automatización y Robótica del AMTC. Su colaboración y ayuda fueron las que hicieron posible la llegada a buen puerto de este trabajo.

Finalmente quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Javier Ruiz del Solar, quien con su dirección, conocimiento y enseñanza me guio a través de este proceso.

Tabla de contenido

Resumen	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Tabla de contenido.....	iv
Índice de figuras	vi
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Estructura de la Tesis.....	2
Capítulo 2: Revisión bibliográfica	3
2.1. El proceso extractivo mediante máquinas LHD	3
2.1.1. Tipos de minería subterránea.....	3
2.1.2. Organización y estructuración de tareas.....	4
2.1.3. Automatización y desafíos operacionales	6
2.2. Navegación autónoma de LHD.....	7
2.2.1. Mapas y representación del entorno	7
2.2.2. Localización.....	8
2.2.3. Planificación de trayectorias.....	8
2.2.4. Navegación deliberativa y reactiva.....	9
2.2.5. Sistemas comerciales de navegación subterránea	10
2.3. Carga autónoma con LHD	11
2.3.1. Materiales granulares.....	11
2.3.2. Caracterización del material apilado	12
2.3.3. Excavación autónoma.....	13
2.3.4. Patentes.....	14
2.4. Esquemas de operación integrados	16
2.4.1. Planificación de la integración	16
2.4.2. Métodos de integración	16
2.4.3. Buenas prácticas	17
2.5. Robot Operating System (ROS)	18

Capítulo 3: Metodología y lineamientos de desarrollo.....	19
3.1. Infraestructura y equipos	19
3.1.1. Prototipo de laboratorio.....	19
3.1.2. Pruebas a escala real.....	22
3.2. Entrevista y obtención de conocimiento experto.....	23
3.3. Carga autónoma.....	25
3.4. Modelo de integración.....	26
Capítulo 4: Propuesta de modelo de integración.....	27
Capítulo 5: Implementación carga autónoma.....	30
5.1. Modelo conceptual.....	30
5.2. Análisis de excavación con operador humano.....	30
5.3. Algoritmo de excavación autónoma.....	34
5.4. Programación de software.....	37
5.4.1. Software prototipo de laboratorio.....	37
5.4.2. Software máquina escala real.....	37
5.4.3. Software común.....	38
Capítulo 6: Pruebas, resultados y análisis.....	42
6.1. Definición de métricas.....	42
6.2. Pruebas prototipo de laboratorio.....	43
6.3. Pruebas LHD real.....	48
6.3.1. Cargas autónomas en <i>stockpile</i>	48
6.3.2. Cargas autónomas en caserón.....	52
Capítulo 7: Conclusiones.....	56
Bibliografía.....	57

Índice de figuras

Figura 1: Prototipo de laboratorio de LHD, escala 1:5.	20
Figura 2: Cilindros y articulaciones de levante, volteo y dirección.	20
Figura 3: Punto de extracción a escala con granulometrías homogénea (izquierda) y heterogénea (derecha).	21
Figura 4: Rampa construida sobre punto de extracción para circular material extraído.	22
Figura 5: LHD marca GHH modelo LF11H	23
Figura 6: Variables carga teleoperada para prototipo de laboratorio: levante, volteo, pedal, corriente de motor trasero, ángulo del balde y derrape de las ruedas.....	32
Figura 7: Resultado de carga teleoperada para prototipo de laboratorio.....	32
Figura 8: Variables carga teleoperada con línea de vista para LHD real: levante, volteo, pedal, presión de transmisión hidráulica, extensión de cilindro de volteo y derrape.....	33
Figura 9: Resultado carga teleoperada con línea de vista para LHD real.....	33
Figura 10: Fases de la excavación.	36
Figura 11: Cargas autónomas con material granular homogéneo. Tamaño de los círculos representan nivel de derrape de los trenes delantero (azul) y trasero (rojo).....	44
Figura 12: Cargas teleoperadas con material granular homogéneo. Tamaño de los círculos representan nivel de derrape de los trenes delantero (azul) y trasero (rojo).....	45
Figura 13: Desempeño comparativo entre cargas autónomas y teleoperadas para material granular homogéneo.	45
Figura 14: Imágenes obtenidas desde la cámara del prototipo de laboratorio. (a) Previo a la excavación, (b) Resultado de una carga autónoma, (c) Resultado de una carga teleoperada por experto, (d) Resultado de carga teleoperada por novato.	46
Figura 15: Desempeño comparativo entre cargas autónomas, teleoperadas por experto y teleoperadas por novato para material granular heterogéneo.	47
Figura 16: Variables relevantes durante una carga autónoma en punto de acopio.....	49
Figura 17: Balde cargado resultante de una carga autónoma en punto de acopio.....	50
Figura 18: Variables relevantes durante una carga manual en punto de acopio.....	51
Figura 19: Balde cargado resultante de una carga manual en punto de acopio.....	52
Figura 20: Variables relevantes durante la carga autónoma en caserón.....	53
Figura 21: Balde cargado resultante de la carga autónoma en caserón.....	54
Figura 22: Variables relevantes durante una carga teleoperada con línea de vista en caserón.	54
Figura 23: Balde cargado resultante de una carga teleoperada con línea de vista en caserón.....	55

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

La mediana y gran minería dependen del manejo de maquinaria capaz de realizar las tareas necesarias para la explotación de un yacimiento de mineral. Hacer caminos, túneles, fragmentar rocas y extraerlas son algunos de los desafíos que se presentan desde la implementación hasta el final de su vida útil. En particular para la minería subterránea, una de las máquinas indispensables para el desarrollo de la actividad son los LHD (del inglés *Load-Haul-Dump*). Un LHD es un vehículo de cuatro ruedas con una articulación central accionada hidráulicamente y un mecanismo de pala con dos grados de libertad ubicado en el frente, muy similar a un cargador frontal, pero de bajo perfil, lo que le permite ser utilizado en espacios reducidos. Su función consiste recoger material (*load*), típicamente de propiedades granulares, como tierra, piedras o roca fragmentada, transportarlo (*haul*) y depositarlo (*dump*) en un lugar de destino.

La automatización de la maquinaria minera es una tendencia que ha cobrado mayor importancia con el transcurso del tiempo, principalmente por el ambiente peligroso, impredecible y a veces incluso inhóspito en el que deben ser manejadas, lo que genera una serie de riesgos para los operadores manuales de los equipos. Lo anterior sumado a los potenciales beneficios económicos por aumento del factor de utilización, reducción del desgaste de los componentes y operación eficiente de la máquina, hacen del concepto de la minería autónoma una promesa interesante.

En el caso de los LHD, la automatización de estos vehículos ha sido exitosa en las fases de transporte y descarga de material en su ciclo de operación, existiendo soluciones comerciales ofrecidas por la mayoría de los grandes proveedores de estos equipos. La etapa de carga, sin embargo, no ha podido ser solucionada efectivamente y, si bien existen desarrollos en esta línea, no existe un marco claro acerca de cómo los distintos componentes de software necesarios se integran en un modelo operacionalmente sólido.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo de esta Tesis es diseñar y validar un algoritmo de excavación de mineral con equipos LHD para minería subterránea, el cual se base en las técnicas aplicadas por operadores humanos, y adicionalmente considere las diferentes características, tareas, requisitos y dinámicas de la operación minera, que le permitan insertarse en un esquema integrado de operación automatizada.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos considerados para este trabajo se detallan a continuación:

1. Identificar los aspectos relevantes a considerar para la automatización de la etapa de carga de mineral con equipos LHD en minería subterránea.
2. Diseñar una metodología lógica apropiada para enfrentar las dificultades del proceso de carga y que permita una integración simple e intuitiva con otros componentes de software y con la operación teleoperada del equipo.
3. Diseñar un algoritmo de excavación de mineral para máquinas LHD, el cual se inserte en el modelo de operación integrado.
4. Definir métricas para evaluar el sistema de carga autónomo desarrollado.
5. Validar el método de excavación propuesto.

1.3. Hipótesis

La hipótesis que se postula para el desarrollo de este trabajo es que es posible automatizar la carga de mineral con máquinas LHD en minería subterránea, formulando el proceso como una secuencia de etapas que cumplen objetivos específicos y plasmando las mismas reglas que utilizan los operadores humanos en un algoritmo computacional, el cual debe, además, sustentarse sobre un esquema de decisiones lógicas, capaces de integrar otros componentes de software y la operación teleoperada.

1.4. Estructura de la Tesis

El documento se divide de la siguiente manera: la Sección 2 presenta una revisión bibliográfica de la materia de estudio; la Sección 3 introduce la metodología y lineamientos de desarrollo, así como la infraestructura; luego, en la Sección 4 se diseña y propone un modelo integral para la operación autónoma de LHD; en la Sección 5 se expone el diseño y los detalles de implementación de un método de excavación, el cual se concibe dentro del modelo integral de carga autónoma presentado anteriormente; posteriormente, en la Sección 6, se definen métricas para evaluar el desempeño del método de excavación, se explican las pruebas que se realizaron, tanto a nivel de prototipo de laboratorio como a escala real, y se muestran y analizan los resultados obtenidos; finalmente, en la Sección 7 se plantean las principales conclusiones del trabajo.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

En este capítulo se revisa el estado del arte en la operación autónoma de LHD. Se comienza con una descripción del proceso de extracción de mineral en minería subterránea a mediana y gran escala, luego dos de los tres componentes básicos de operación con LHD (carga y navegación) son revisados en detalle. La descarga se excluye debido a la facilidad de su implementación autónoma mediante movimientos pre-programados de la pala. Finalmente se abarcan conceptos de integración de software y se presenta una herramienta particular utilizada fuertemente en el mundo de la robótica.

2.1. El proceso extractivo mediante máquinas LHD

En la mediana y gran minería subterránea la extracción de mineral se lleva a cabo con máquinas tipo LHD, muy similares a los cargadores frontales, pero que están diseñadas para operar en ambientes estrechos, por lo que son de bajo perfil y permiten una conducción en ambos sentidos. En esta sección se ahonda brevemente en los métodos de explotación subterránea; las tareas cotidianas que debe llevar a cabo un operador de LHD para el caso particular de minería mediante “block caving”, de modo de tener una visión global de la operación; y finalmente se destacan los desafíos más relevantes en temas operacionales que deben ser superados para llegar a un nivel de automatización total del proceso extractivo.

2.1.1. Tipos de minería subterránea

Dependiendo principalmente del tamaño, forma, orientación y dureza del cuerpo mineral, el método de minería se puede seleccionar de entre una amplia gama de opciones [1]. Algunas de ellas se resumen brevemente a continuación.

Room-and-Pillar Mining: se utiliza cuando el cuerpo mineral presenta una forma ancha y aplanada. El método consiste en dejar pilares en un patrón regular, mientras todo el resto del espacio en el plano de la masa rocosa es removido. Usualmente al final también se remueven los pilares, empezando desde el más alejado, para aumentar la cantidad de mineral extraído.

Vein Mining: las dimensiones del cuerpo mineral son altamente variables, desde vetas enormes de varios kilómetros cuadrados en superficie, hasta capas de tan solo medio metro de espesor. En general el método consta en excavar túneles que permitan el acceso y explotación dirigida de la roca que contiene el mineral, evitando fracturar el resto del cuerpo rocoso. El mineral es luego recogido por máquinas LHD, en algunos casos incluso tan pequeñas como de 2 m³ de capacidad.

Shrinkage Stopping: este método se aplica cuando el depósito mineral tiene una pendiente muy pronunciada y consiste en explotar la roca en forma vertical desde la parte inferior. Luego de ser fracturado, la mayor parte del mineral se deja en el lugar, para servir como soporte y plataforma para las explosiones de los niveles superiores. Sólo una vez que todo el mineral ha sido quebrado, se procede a la extracción.

Sublevel Open Stopping: también se utiliza para explotar un cuerpo mineral de orientación preferentemente vertical, sin embargo, en este caso la fragmentación se realiza por largas franjas ascendentes (“stopes”), las cuales avanzan en forma horizontal. La totalidad del mineral se extrae desde el nivel inferior, inmediatamente posterior a su explosión, lo cual genera que el “stope” vaya quedando abierto a medida que avanza.

Vertical Crater Retreat (VCR): es un método de explotación para yacimientos de orientación vertical, similar al “Sublevel Open Stopping”, pero con la diferencia de que en este caso el avance se realiza de forma vertical. Para esto se definen zonas verticales, delimitadas por un nivel inferior de extracción y uno superior de perforación y carga de explosivos. Desde el nivel superior las perforaciones se realizan directamente hacia abajo siguiendo la orientación del cuerpo mineral. Una vez agotada la zona, se procede a un nivel de producción más profundo, hasta agotar el yacimiento.

Cut-and-Fill Stopping: se utiliza también para yacimientos de orientación preferentemente vertical y forma irregular. La explotación y extracción se produce en forma horizontal y altamente selectiva. Para cada nivel, comenzando desde el más inferior, se extrae el mineral y luego se rellena con roca de desecho, lo cual mantiene la estabilidad y soporte.

Sublevel Caving: consiste en la extracción de mineral a través de un esquema de túneles paralelos distribuidos en distintos subniveles, los cuales se disponen a intervalos regulares en profundidad. La explotación comienza con los subniveles de más arriba y la propagación del fracturamiento de la roca se realiza en forma horizontal, a lo largo del túnel, es decir, el techo del túnel va colapsando y el túnel en sí se va acortando a medida que se avanza con la tronadura. Asimismo, al explotar los niveles inferiores, se produce una conexión con el mineral fragmentado del nivel superior. A medida que se extrae material de la mina, el terreno en superficie experimenta subsidencia.

Block Caving: esta técnica utiliza la gravedad, en conjunto con el estrés interno de las rocas, para fracturar el macizo rocoso a niveles en que pueda ser manejado por mineros. El “bloque” se refiere a una gran sección del yacimiento, definido en el plano minero. El fenómeno de “caving” se induce explotando la porción inferior del bloque. Al remover la roca que actúa de soporte, el cuerpo mineral sobre ésta pierde estabilidad y la gravedad induce un fracturamiento, que eventualmente se propaga y afecta todo el bloque. La presión continua genera el resquebrajamiento del mineral en trozos cada vez más pequeños, hasta ser adecuados para manejarlos con máquinas LHD. Ante la eventualidad de que el material que llegue al punto de extracción tenga una granulometría demasiado gruesa, técnicas de reducción secundaria (explosivos) son utilizadas para disminuirla hasta los niveles adecuados.

2.1.2. Organización y estructuración de tareas

En la mediana y gran minería, la estructuración diaria o por turnos de las tareas y actividades están íntimamente ligadas con las metas de producción establecidas y por las cuales se rige la planificación minera de la extracción de mineral. Típicamente se cuenta con un número de puntos de extracción habilitados simultáneamente, algunos de los cuales son asignados a un determinado operador y máquina LHD para su explotación. Durante su turno, las tareas del operador no se remiten únicamente a la carga y descarga del mineral y conducción de la máquina, sino que, éste, debe hacer una serie de otros chequeos e inspecciones rutinarias, así como lidiar con múltiples fuentes de interferencia y demoras. Las más comunes, entre las que se cuentan en la gran minería con “block caving”, se muestran en la tabla a continuación [2].

TABLA 1: RESUMEN DE OPERACIONES PARA UN TURNO DE TRABAJO.

Operación	Actividad	Descripción
Inicio de turno	Ruta entrada de turno	Llegada de buses.
		Charla de negocio, seguridad, calidad y medio ambiente.
		Nombrada y arribo a posturas.
Operación LHD	Chequeo LHD	Colocación de cintas de confinamiento.
		Revisión de estado de calle e infraestructura.
		Revisión funcionamiento equipo LHD.
	Ciclos LHD	Carga de mineral.
		Transporte y maniobras.
		Descarga de mineral.
	Limpieza de calles	Remoción de fragmentos de roca u otros elementos para despejar vías de transporte.
	Inversión LHD	Cambio de sentido de tránsito del equipo LHD
	Cambio de calle	Tránsito y reubicación del equipo LHD en otro túnel para extracción.
	Carga de petróleo	Traslado y reabastecimiento de combustible.
	Interferencias operacionales	Pique de traspaso lleno.
		Traslado por mantención (programada o no programada).
		Reapriete de neumáticos.
		Traslado de colpas que no se pueden descargar en el chancador.
		Polvo en calle.
Interferencias por agentes externos	Reducción secundaria.	Perforación de rocas que generan dificultades para cargar.
		Carga de explosivos y tronadura de colpas.
	Muestreo	Recoger muestras de los puntos de extracción para obtener información de leyes, granulometría, humedad, etc.
	Reparación y mantención	Reparación de la carpeta de rodado.
		Reparación o mantención de martillos pica roca.
	Choca	Colación

Salida de turno	Ruta salida de turno	Arribo a barrio cívico interior mina.
		Traslado de buses a superficie.
Cambio de turno	Cambio de turno	Cambio de operador tanto en sala de operación como en la mina.

2.1.3. Automatización y desafíos operacionales

La automatización completa de las operaciones de producción que involucran máquinas LHD es una tarea compleja y desafiante, por una parte debido a que las actividades unitarias de carga y navegación no son trivialmente automatizables, y requieren de grandes esfuerzos para ofrecer una solución robusta a largo plazo, sino también porque se deben tener en consideración una serie de otros factores, presentados en la subsección anterior, entre los cuales destacan procedimientos, tareas e interferencias cotidianas, como por ejemplo la limpieza de calles, recarga de petróleo y traslado de colpas u otros materiales que no se pueden vaciar directamente en el chancador. No obstante lo anterior, los desarrollos en soluciones autónomas se han ido consolidando como la única estrategia viable a largo plazo para la minería subterránea, principalmente debido a las precarias y riesgosas condiciones laborales para operadores en terreno, pero también por factores económicos ligados a las siguientes mejoras en el proceso [3] [4]:

- Mayor disponibilidad de equipos: las máquinas necesitan menos tiempo en taller debido a mantenciones no programadas, gracias al uso de diagnóstico temprano de fallas y monitoreo en línea. Se disminuye también el deterioro del equipo por colisiones o sobrecargas.
- Mayor utilización: el LHD puede pasar mayor tiempo dedicado a su ciclo productivo debido a la eliminación del cambio de turno de operadores.
- Mayor rendimiento: la tasa de extracción de mineral puede aumentar debido a una mejor gestión de la flota de vehículos autónomos y también por una menor variabilidad del factor de llenado del balde.
- Mayor productividad: se requieren menos operadores para el conjunto de máquinas, ya que su labor queda remitida únicamente a supervisar y asistir.

Si bien el porcentaje de mejora de los puntos anteriores queda sujeto a discusión, y podría incluso presentar un peor desempeño si no se toman las precauciones y preparación correspondiente de personal [5], es indudable que una adecuada gestión del proceso de transición hacia la operación completamente autónoma, genera grandes beneficios para la minería del futuro.

Entre los desafíos que al día de hoy se encuentran pendientes por solucionar, para asegurar una correcta y completa automatización de la producción se pueden mencionar [6]:

- Nuevas capacitaciones y especialización del personal de mantención y reparaciones. Se necesita un cuerpo técnico y profesional que domine los conceptos involucrados en la lógica de operación autónoma, sus estados de advertencia y falla, así como también que esté familiarizado con el hardware específico que requieren los equipos.
- Visión global de la operación y fuerte incorporación de la capacidad del equipo autónomo para lidiar con interferencias.
- Integración con sistemas de sensores e información de la mina, de modo de mejorar la capacidad del sistema autónomo a adaptarse a las condiciones variables de disponibilidad

de puntos de extracción, cierre de calles o túneles para labores de mantenimiento de las mismas, etc.

- Mejora de los sistemas de navegación para permitir velocidades de traslado más altas que no comprometan la seguridad e integridad del equipo.
- Afinamiento y validación de los últimos desarrollos en la tecnología de carga autónoma, que hasta el día de hoy es una tarea que sólo se realiza de forma teleoperada.

2.2. Navegación autónoma de LHD

En esta sección se presentan brevemente los módulos o componentes habilitadores principales de un sistema de navegación autónoma para LHD. Actualmente existen varios ejemplos de sistemas comerciales de este estilo, desarrollados específicamente para cada uno de los grandes proveedores de equipos, y los cuales se comentan también al final de esta sección.

2.2.1. Mapas y representación del entorno

Un mapa es una descripción simplificada del entorno, en la que ciertas características o detalles relevantes son resaltados para ayudar en la tarea de navegación. Los mapas utilizados por las personas corresponden usualmente a representaciones bidimensionales muy detalladas de un espacio geográfico tridimensional. Para los robots, sin embargo, una caracterización tan detallada no es siempre la mejor manera de representar el entorno. La mayoría de los mapas utilizados en robótica corresponden a uno de los siguientes tipos: métricos, topológicos o híbridos [7].

Mapas métricos: es un tipo de mapa en el que las distancias y tamaños de los objetos reflejan lo más fielmente posible las dimensiones del mundo real. Dentro de los mapas métricos, se pueden distinguir dos principales subcategorías: mapas de grilla y mapas de características. En los mapas de grilla, también usualmente referidos como grillas de ocupancia, el área es discretizada en una malla de cuadrados. En esta matriz de celdas, cada celda representa propiedades relevantes del espacio que ocupa en el mundo real. Una representación común, por ejemplo, es si la celda se puede atravesar o está ocupada. Por otra parte, los mapas de características son más simples y sólo guardan detalles o marcadores fundamentales del área que se representa, como por ejemplo podrían ser posiciones y dimensiones de esquinas, paredes o incluso marcadores artificiales insertos especialmente en el ambiente.

Mapas topológicos: en un mapa topológico el énfasis se encuentra principalmente en las interconexiones entre distintas ubicaciones, más que las distancias entre ellas. Se representa comúnmente como un grafo, donde las ubicaciones importantes se denominan nodos y las interconexiones entre los nodos se llaman aristas. Este tipo de mapas no toma en cuenta la escala, por lo que la distancia y orientación entre nodos no se condice con la disposición física de estos lugares en el mundo real. Por otro lado, ya que el foco de los mapas topológicos es conectividad, resulta particularmente útil para tareas de planificación de rutas en ambientes estructurados como túneles de minas, corredores o carreteras.

Mapas híbridos: los mapas híbridos son una combinación de diferentes mapas, donde estos mapas son también usualmente de distinto tipo. Una forma común de mapa híbrido es cuando se utiliza un mapa topológico para unir distintos mapas locales métricos, combinando así las fortalezas de ambos tipos de representaciones.

2.2.2. Localización

Para poder llevar a cabo cualquier tipo de tarea, un requisito usual en los robots móviles es primero ser capaz de determinar su posición relativa en el ambiente que lo rodea, utilizando algún tipo de sistema de referencia, es decir, debe ser capaz de localizarse.

La localización y construcción de mapas son dos funcionalidades que se encuentran íntimamente ligadas dentro del campo de la investigación en robos móviles, siendo posible el realizar ambas de forma simultánea con diferentes técnicas derivadas del SLAM [8] [9]. Sin embargo, debido a que actualmente los sistemas de navegación en túneles subterráneos utilizan principalmente un mapa construido a priori, el alcance de esta subsección se limita únicamente a los sistemas de localización con mapa conocido.

Existen diferentes maneras de categorizar los sistemas de localización. Una de las más importantes es la que diferencia entre los algoritmos que son capaces de inferencia directa de la posición, de aquellos que sólo realizan un seguimiento o *tracking* de la misma [10] [11].

Las estrategias de localización capaces de inferencia directa pueden proveer una pose precisa del robot en el mapa, basadas únicamente en la información de sensores exteroceptivos. Para esto el robot debe ser equipado los sensores adecuados y poseer un mapa detallado del entorno, en el cual no puede existir riesgo de aliasing perceptual, es decir, que dos o más lugares no pueden verse idénticos desde los sensores del robot [12].

En la práctica resulta difícil implementar soluciones de inferencia directa, por lo que el seguimiento de la pose es usualmente preferido. En estos esquemas, que pueden ser de hipótesis simple o múltiple, la pose inicial y conocida del robot es continuamente actualizada haciendo uso de los sensores propioceptivos y exteroceptivos del sistema [13]. Este tipo de algoritmos permite corregir errores iniciales y subsecuentes en la estimación de la pose, sin embargo, si el error es demasiado grande, éste podría llegar a divergir. La diferencia entre los esquemas de hipótesis simple y múltiple es que, en el último caso, varios supuestos de la pose del robot son estimados conjuntamente y, de entre ellos, el con mayor credibilidad o verosimilitud es escogido para representar la pose real estimada [14]. Bajo este tipo de método el robot podría llegar a recuperarse de una estimación incorrecta del movimiento (por ejemplo, ante un raptó [15]) y no así al utilizar métodos de hipótesis simple.

2.2.3. Planificación de trayectorias

En el campo de la robótica móvil, la planificación de trayectorias se refiere al acto de planificar el movimiento a través del entorno para llegar a una determinada ubicación objetivo. Debido a que la representación del ambiente se hace mediante mapas, el tipo de planificación de trayectorias está intrínsecamente ligado al tipo de mapa que se utilice, es decir, a grandes rasgos existe la planificación métrica y topológica. Naturalmente el uso de un esquema híbrido produce combinaciones entre ambos tipos.

Los mapas topológicos, al tener su énfasis en la conectividad entre lugares, ofrecen una herramienta muy adecuada para planificar trayectorias utilizando técnicas muy estudiadas y maduras de búsqueda de rutas de mínimo costo en grafos, como los algoritmos A^* , Dijkstra o RRT (*Rapidly-Exploring Random Tree*) [16] [17] [18]. Debido a que los mapas topológicos tienen, comúnmente, un tamaño pequeño o moderado, los requerimientos o recursos computacionales necesarios para utilizar estos métodos son bastante modestos. La desventaja de

este tipo de planificador es que puede resultar difícil estimar el costo real de transitar entre dos nodos del mapa, así como también el desarrollar un reconocedor de nodos apropiado, de modo que el robot pueda percatarse oportunamente cuando ha arribado a un lugar conocido.

La planificación de trayectorias en mapas métricos suele involucrar un proceso más complejo, ya que el mapa no explicita la conectividad entre lugares. Más aún, diferentes tipos de aproximaciones deben ser utilizadas dependiendo si el mapa métrico es de grilla o de características.

Dos métodos comúnmente usados en mapas de tipo grilla son las planificaciones basadas en grafos y en frente de ondas. En la planificación basada en grafos, el mapa de grilla es visto como una red de nodos, donde cada celda desocupada es clasificada como un nodo y está conectada a todos los nodos (celdas desocupadas) adyacentes. De esta forma el problema se reduce nuevamente a una búsqueda en grafos [19]. La planificación basada en frente de ondas corresponde a un método donde la búsqueda del camino óptimo comienza desde la celda objetivo del mapa. Desde esta celda una “onda” es propagada hacia todas las celdas adyacentes, para cada una de las cuales un costo es calculado. El costo se calcula utilizando la celda contigua de menor costo ya conocido (calculado anteriormente) más una porción incremental que depende de la celda actual. Una vez que se alcanza la celda correspondiente a la posición actual del robot, el camino de menor costo se puede rastrear seleccionando siempre la celda vecina de menor costo [20].

Cuando se requiere realizar una planificación de trayectoria en un mapa de características, la aproximación de tipo “Road Map” es usualmente utilizada. Esto significa que el espacio libre es particionado en un conjunto de caminos que son seguros y no llevan a colisiones con obstáculos conocidos. Una de estas técnicas corresponde al “Grafo de Visibilidad” [21], que es un grafo que conduce de un punto a todos los otros puntos visibles desde el mismo. Otro método es calcular el “Grafo de Voronoi” [22], en el cual para cada nodo se maximiza la distancia entre el robot y los obstáculos. En ambos casos el problema de planificación en mapas métricos se reduce a uno en mapas topológicos.

2.2.4. Navegación deliberativa y reactiva

En la actualidad existen tres paradigmas o aproximaciones en cuanto a cómo conducir un robot móvil a través de un entorno, utilizando la información sensorial adquirida: jerárquico o deliberativo; reactivo; e híbrido [7]. Estos paradigmas difieren radicalmente en cuanto a sus supuestos acerca de la localización del robot. En un esquema deliberativo, también conocido como navegación absoluta, se confía en una precisa localización del robot dentro del mapa global, y con esta información se calcula un camino que el robot debe seguir, expresado también en coordenadas globales. Por otro lado, en una aproximación reactiva, el énfasis se ubica en la detección precisa de características del mapa local, de modo de seguir un camino construido en torno a éstas en vez de sobre un sistema de coordenadas. En términos generales, los distintos esquemas se pueden plantear en cuanto a cómo relacionan tres conceptos fundamentales: Sensor, Planificar y Actuar. A continuación, se provee una breve descripción de cada método.

Deliberativo: es el más antiguo de los tres y está construido sobre la secuencia “Sensor – Planificar – Actuar”, con el énfasis en la planificación [23] [24]. El robot primero utiliza sus sensores para actualizar su modelo del ambiente y luego planifica las acciones basadas en el mismo modelo. Debido a que no hay una conexión directa entre las mediciones y las acciones, el

lazo de control es simplemente prealimentado, lo que deja al robot vulnerable ante las condiciones dinámicas e inesperadas del mundo real y lo limita a una operación únicamente en ambientes estáticos y con movimientos lentos.

Reactivo: se caracteriza por utilizar múltiples instancias de secuencias “Sensar – Actuar”. La principal idea tras el esquema reactivo es separar el control del sistema en varias unidades más pequeñas de pares sensor-acción, denominados comportamientos o *behaviours* [25]. De esta forma cada *behaviour* sólo toma un tiempo breve de ejecución, lo que permite lazos de control rápidos. A su vez la acción final del robot corresponde a una combinación entre las salidas de los distintos comportamientos, lo que le permite lidiar con múltiples objetivos simultáneamente. Algunos ejemplos que utilizan esta formulación son la lógica difusa, máquinas de estado finitas y campos potenciales. La principal desventaja es la falta de planificación, lo que hace a este método inflexible en cambios en el objetivo, ya que este se encuentra prácticamente fijo en la programación de los comportamientos.

Híbrido: este sistema se originó por el interés de tener robots capaces de actuar bajo el paradigma reactivo, pero sin perder su capacidad de ejecutar tareas complejas [26]. Así, se propuso un método basado en las directivas de “Planificar, Sensar – Actuar”. Bajo esta aproximación un planificador da las indicaciones de alto nivel, las cuales son ejecutadas por la parte reactiva, tal como se ejemplifica en el Diagrama 1.

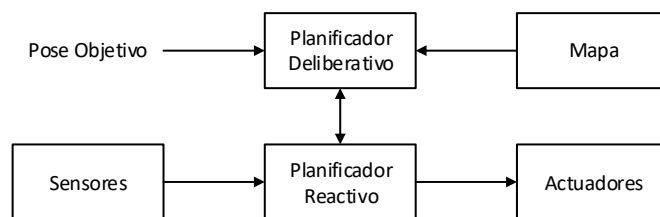


DIAGRAMA 1: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN HÍBRIDO.

2.2.5. Sistemas comerciales de navegación subterránea

Actualmente la mayoría de los grandes fabricantes de LHD ofrecen entre sus productos sistemas de automatización para la navegación autónoma en los túneles de las minas subterráneas: AutoMine de Sandvik, MineStar de Caterpillar y Scooptram Automation de Atlas Copco, entre otros.

AutoMine: es el nombre del sistema de automatización de LHD ofrecido por la compañía Sandvik. El paquete de software incluye traslado y descarga autónoma, junto con carga teleoperada. El traslado, y por lo tanto la localización y navegación, está basado en un paradigma absoluto, es decir, depende de la odometría y detección de marcadores naturales del entramado de túneles [27]. Los sensores que utiliza son un encoder para la articulación central, odometría y giróscopo en combinación con dos sensores láser. La forma en que se realiza la localización es tomando un perfil del túnel en una sección de 5 metros de longitud y comparándola con un mapa conocido. El perfil del túnel se obtiene mediante una aproximación por rectas (polilínea) de los datos bidimensionales adquiridos con los láseres, a la altura en que están montados sobre la máquina. El mapa, por su parte, es creado mediante un método de entrenamiento, que incluye la conducción manual del equipo para permitir a los sensores registrar las características de los túneles. El problema de este método es que la localización durante la construcción del mapa se

basa únicamente en odometría, por lo que debe ser compensado con otras técnicas como cierre de lazos [28].

MINEGEM: el sistema de automatización de la compañía CAT, a diferencia del anterior, está basado en un esquema de navegación reactiva/híbrida y cuenta con desarrollos desde hace dos décadas [29] [30] [31] [32]. Los sensores utilizados son un sistema de navegación inercial (INS), encoders (odometría y articulación central) y dos láseres. No obstante, al tratarse principalmente de un sistema reactivo, el seguimiento de las paredes del túnel no permite realizar el ciclo completo de carga, transporte y descarga de mineral, por lo que lo anterior es acoplado con un mapa topológico, que contiene información acerca de los puntos de carga, vaciado, intersecciones y otros marcadores que son utilizados en un esquema de localización oportunista. El sistema desarrollado también permite que el LHD reciba instrucciones de alto nivel, en un modo denominado “copiloto”, de modo que el operador pueda asistir a la conducción de la máquina en condiciones más difíciles como intersecciones grandes o esquinas muy anguladas.

Scooptram Automation: el software utilizado por la compañía Atlas Copco hace uso de un paradigma híbrido de navegación [7]. Utilizando dos sensores láser, un encoder para la articulación central y el de la transmisión (odometría), un conjunto de comportamientos o *behaviours* son programados bajo un esquema de lógica difusa para conformar la parte reactiva, mientras que un planificador de más alto nivel es utilizado en intersecciones o espacios abiertos para dar indicaciones acerca de qué comportamientos tienen que ser utilizados y con cuánta ponderación. El mapa global considerado corresponde a uno híbrido, donde el mapa topológico global almacena todas las intersecciones, puntos de carga, vaciado y otros puntos de interés como nodos, mientras que los túneles de la mina quedan representados por las aristas. Además, cada nodo contiene un mapa geométrico local con características relevantes para la localización. Por último, la planificación del camino óptimo entre dos nodos del mapa topológico es llevada a cabo por una implementación del algoritmo Dijkstra.

2.3. Carga autónoma con LHD

Del ciclo principal de producción de los LHD, que es la carga, transporte y descarga de mineral, la primera es la única que no se ha logrado solucionar completamente. A pesar de los múltiples esfuerzos que se han realizado en el último tiempo [33] [34] [35] [36], ningún sistema comercial de carga autónoma se encuentra hoy disponible en el mercado. En esta sección se abordarán los avances en este tópico, así como las dificultades intrínsecas del proceso.

2.3.1. Materiales granulares

Conocer algunas características de los medios granulares resulta especialmente relevante para entender la complejidad del proceso de carga de material con una pala. Particularmente, el interés radica en la distribución de los esfuerzos al interior de la pila o cerro de material, para así tener una noción de a qué tipo de fuerzas debe enfrentarse la máquina al excavar. Más aun, de ser posible modelar dichos esfuerzos, esto permitiría incluso idear estrategias de carga energéticamente eficientes.

La transmisión de esfuerzos en materiales granulares comenzó como objeto de estudio principalmente por su importancia en aplicaciones de la ingeniería civil, química y geofísica, y en la industria alimenticia [37]. Diversos modelos han sido propuestos para caracterizarla, entre ellos elasto-plásticos [38], hiperbólicos [39] [40] y difusivos [41], cada uno con un éxito parcial,

ya que logran describir ciertos fenómenos locales observables experimentalmente en materiales homogéneos, pero no consiguen representar al medio en forma global, ni al caso general heterogéneo. También ha sido reconocido que las fuerzas en los medios granulares tienden a orientarse localmente según direcciones preferenciales, dando origen a cadenas de esfuerzos [42], siendo la propiedad más estudiada de este fenómeno, nuevamente en material homogéneo, la función de distribución de probabilidad [43] [44] [45].

Otra de las observaciones en las pilas de material granular que ha llamado la atención y llevado a la comunidad científica, hasta el día de hoy, a la búsqueda de modelos, es la depresión en la fuerza vertical que se mide justo en el centro de la base de un montículo de material. Ésta, además, depende de la forma en la que se construye la pila [46], es decir, el medio posee memoria. En los últimos años, la creciente capacidad computacional disponible ha permitido elaborar simulaciones que reproducen el fenómeno con el uso de distintas técnicas, como por ejemplo el análisis de elementos finitos (FEM) alimentado por un modelo de hipoplasticidad micro-polar [47], o incluso en conjunto con modelos elasto-plástico clásicos y el historial de la pila [48] [49]. De igual forma, el método de elementos discretos (DEM) ha sido utilizado exitosamente para caracterizar el comportamiento a nivel de partícula [48], logrando también representar la formación de las cadenas de esfuerzo, propiedad que ha sido relacionada con el efecto de depresión del peso bajo la cima [50] [51].

Una explicación más completa de las propiedades del medio granular se puede encontrar en [52]. Sin embargo, éstas, así como las expuestas anteriormente en esta subsección, aplican para medios secos y por lo tanto las interacciones microscópicas predominantes entre las partículas son el roce y las colisiones inelásticas. Distinto es el caso cuando existe humedad en el ambiente, la cual da origen a fuerzas cohesivas mucho mayores, alterando considerablemente las propiedades macroscópicas y complejizando su modelamiento. Para una revisión más detallada respecto a esto último el lector es referido a [53].

2.3.2. Caracterización del material apilado

Si bien resulta sumamente complejo intentar modelar las interacciones inter-partícula para un material granular, otras técnicas, provenientes del mundo del procesamiento de imágenes, pueden ser utilizadas para intentar caracterizar la pila de material en forma externa.

En el caso particular de las aplicaciones a la minería, ya en el año 1997, Petty [3], propuso la caracterización del punto de extracción mediante el cómputo de tres propiedades del mismo: la distribución del material, la geometría en el lugar de excavación y el máximo gradiente de la pila. El sensor seleccionado fue una cámara CCD y un emisor de luz estructurada, lo cual permitía obtener un modelo tridimensional del entorno. Los tres parámetros indicados se utilizaban cada uno para una finalidad específica. Primero, la decisión del lugar exacto de donde se sacaría la siguiente baldada quedaba determinado por la distribución de material. Luego la geometría dictaba la trayectoria a realizar durante la carga y, finalmente, el máximo gradiente permitía evaluar la estabilidad de la pila, de modo que fuese posible evitar el intento en condiciones adversas. Si bien este trabajo fue sólo una propuesta conceptual, sirvió como una primera aproximación al sistema completo de automatización de una máquina LHD.

Un trabajo, cuyas contribuciones a este tópico cabe destacar, es [54]. En él se aborda la clasificación de las superficies mediante una nube de puntos generada por un sensor de rango (como un LIDAR), a partir de una metodología matemática llamada *Normal-Distributions*

Transform (NDT). La tesis describe el uso de esta técnica, en minería subterránea, para identificar las zonas de un amontonamiento de mineral aptas para realizar una carga, o por el contrario que sean demasiado irregulares (con contenido de rocas muy grandes) para estos efectos.

Más recientemente, McKinnon y Marshall implementaron un algoritmo de segmentación de rocas grandes [55]. El sensor utilizado fue una cámara TOF y el procesamiento se hizo en base a la información de curvatura local de los datos. En una comparación con operadores humanos el sistema demostró un desempeño similar, excepto bajo condiciones de oclusión de los bordes, marcada irregularidad de la superficie o cuando los objetos estaban muy alejados. Esta idea de segmentar rocas grandes también ha sido aplicada en [56], donde se utiliza un LIDAR y el agrupamiento (*clustering*) de puntos se hace en base a la orientación de las normales a las superficies.

2.3.3. Excavación autónoma

El desarrollo de la excavación autónoma se ha enfocado históricamente a una de tres tipos de máquina: retroexcavadoras, cargadores frontales y LHDs. Sus inicios datan de mediados de los años 80 en la Unión Soviética [57] y en occidente de principios de los 90, con las investigaciones desarrolladas en las universidades de Lancaster [58] [59] y Purdue [60], para la automatización de una retroexcavadora, y en el *Noranda Technology Centre* (NTC), en Montreal, Canadá, tanto para el transporte como para la carga con una unidad LHD. El trabajo en el NTC tuvo un mayor grado de involucramiento, ya que fue apoyado directamente por la industria. El objetivo en este último fue lograr que la máquina ejecutara el mismo tipo de movimientos que un operador entrenado, para lo cual se montaron una serie de sensores en un vehículo LHD tamaño real. Finalmente, esta iniciativa no tuvo el éxito esperado y fue abandonada. Los resultados tampoco fueron publicados por tratarse de un desarrollo industrial [61]. Esfuerzos más sistemáticos para la automatización de la carga con LHD comenzaron más tarde con el trabajo de Hemami en el *Canadian Centre for Automation and Robotics in Mining* (CCARM) [62] [63] [64]. Más tarde la investigación continuó con lentitud por falta de recursos económicos. En los últimos años se han reportado nuevos trabajos tanto de simulación [36], como de experimentación a escala reducida [65] y a escala real [35], los cuales han sido apoyados más de cerca por la industria.

Desde el punto de vista algorítmico existen tres tendencias predominantes para la carga autónoma en las distintas máquinas que realizan tareas de excavación: las por imitación de un operador humano [66] [67] [68] [69]; las basadas en planificación de trayectorias [70] [71] [72] [73] [74] [34] [36]; y las que se enfocan en control directo de variables [4] [35] [33]. De las mencionadas, sólo la última categoría se ha aplicada a máquinas LHD que operen en condiciones de minería subterránea y la literatura al respecto corresponde principalmente al trabajo realizado por Joshua Marshall, el cual comenzó con una identificación de las variables de interés y caracterización del proceso de carga mediante pruebas experimentales realizadas con una máquina Tamrock EJC 9t. Estas permitieron validar la importancia de la información aportada por los sensores de presión del mecanismo de pala del LHD y sentaron las bases para el posterior desarrollo de un control de la variable de presión (o fuerza) en el cilindro de levante de la máquina, denominado control de admitancia, el cual demostró ser efectivo para llevar a cabo la excavación y carga de material en roca apilada utilizando un LHD Atlas Copco ST14 [35].

2.3.4. Patentes

Los desarrollos patentados en el ámbito de la carga autónoma han sido adjudicados principalmente por Caterpillar. Cabe destacar que el foco de esta empresa fue, inicialmente, en cargadores frontales, a pesar de que en los trabajos se señala que se podría aplicar a otro tipo de maquinaria. Últimamente se ha centrado más la atención en máquinas LHD. A continuación, se exponen las distintas patentes revisadas:

- Roche, para Caterpillar, Inc., 1996 [75]: la patente se refiere a la selección del comando para el cilindro de volteo de un cargador frontal en base a las fuerzas percibidas por ambos cilindros de la articulación, de modo de mantenerlas en “un rango efectivo”, muy similar a lo presentado tres años más tarde por Dasys et al. Se destaca que el sistema no considera un control de la tracción del vehículo, sino que esta tarea queda a cargo del operador. Se señala, en todo caso, que ésta sea preferiblemente dirigida hacia la pila, con máxima aceleración del motor. Además, hace mención al uso de distintos *set points* de control, dependiendo de las condiciones de la pila, las cuales deben ser escogidas por el usuario.
- Dasys et al., para Noranda, Inc., 1999 [76]: se dice que el método inventado “utiliza una realimentación sensorial provista por los sensores de presión y extensión en los cilindros hidráulicos para controlar la trayectoria del balde a ser cargado por un algoritmo computacional”. La patente no hace referencia a ningún modelo de la pila de rocas o intento por calcular una trayectoria eficiente en ningún sentido, previo a la carga, sino que más bien utiliza las señales de esfuerzo de los cilindros para generar comandos de volteo (rotación) del balde, cayendo en la última categoría de algoritmos de la sección anterior. La patente se tradujo en un producto comercial, SiamLoad, a través de un *spin off* generado por Noranda, SiamTech. Cabe mencionar que este sistema requería que el usuario seleccionara una de tres posibles modalidades de carga, según las condiciones del ambiente percibidas por el operador. SiamTech fue luego comprada por la empresa Cattron y el producto de carga autónoma abandonado, sin haberse reportado nunca su uso en la industria.
- Budde, para Caterpillar, Inc., 2005 [77]: corresponde a una continuación del sistema AutoDig de Caterpillar iniciado con el trabajo en los años 90. La carga continúa haciéndose con realimentación de las lecturas de los sensores de presión hidráulica. Adicionalmente se incluye un módulo de reconocimiento automático de que la máquina ha hecho contacto con la pila de material, mediante el monitoreo de la velocidad del vehículo y del motor, así como el torque de la transmisión. El seguimiento de la resistencia al levante también le permite al esquema estimar el factor de llenado del balde, insistiendo en una nueva etapa de carga en caso de que la primera colisión haya sido contra una pila de rocas pequeña ubicada frente a la principal. En la patente se menciona que la actuación del movimiento de volteo tiene prioridad por sobre el de levante y el control de la velocidad sigue haciéndose por parte del operador.
- Alshaer et al., para Caterpillar, Inc., 2009 [78]: el trabajo anterior se complementa con una serie de comportamientos que ayudan a realizar un llenado más exitoso. Por ejemplo, durante la penetración en la pila sólo se mueve el cilindro de levante de la máquina, de esta manera reduciendo la posibilidad de derrape en las ruedas delanteras. Por otra parte, en la etapa de carga sólo se utiliza el volteo del balde, al cual adicionalmente se le envían comandos alternados de movimiento rápido y lento para mejorar la inserción dentro del material. También se agregan nuevos módulos al sistema, como el control de tracción y desplazamiento del vehículo durante la etapa de carga y el manejo de la condición de atasco del cargador dentro de la pila.

- Gordon, para Caterpillar, Inc., 2012 [79]: se describe un proceso de carga en una línea separada de los trabajos anteriores adjudicados por Caterpillar. En éste, el llenado del balde se realiza únicamente con el movimiento de volteo. La particularidad de este desarrollo se centra en que una vez comprobada la inserción en la pila (a través de la resistencia al movimiento), la rotación del balde se acciona hasta alcanzar un ángulo definido, el cual es dependiente del tipo de material. Una vez superado este umbral se inicia la retirada de la máquina, a la vez que se accionan ambos cilindros de la pala para recoger la carga.
- Fletcher et al., para Caterpillar, Inc., 2017 [80] [81] [82]: los últimos trabajos para Caterpillar se ven reflejados en estas tres patentes, las cuales por primera vez son presentadas ejemplificando con un LHD en vez de un cargador frontal, lo cual indica un cambio en el objetivo del desarrollo. La primera patente se refiere a la detección de la colisión entre la máquina y una pila de material, así como el cálculo de otras propiedades de esta última, como su ángulo de reposo y ubicación de su arista en contacto con el suelo. Para ello se nombra el uso de sensores de presión, torque del tren de potencia, velocidad con respecto al suelo y LIDAR. En la segunda patente se describe un método para cargar el balde, el cual se ajusta o adapta a las condiciones de la pila de material. Específicamente, el método considerado consiste en mover alternadamente, en una y otra dirección, el balde de la máquina para lograr una distancia de penetración objetivo en el material. Los parámetros adaptables son el ángulo de la punta de balde, así como las restricciones de movimiento en ambas direcciones (cantidad, velocidad, tiempo), y se seleccionan dependiendo del ángulo estimado de la pila. También la distancia de penetración objetivo se determina continuamente en base al ángulo estimado de la pila y la trayectoria seguida por la punta del balde, de modo que la cantidad de material calculada con esta información coincida con el volumen del balde. Finalmente, la última patente presenta un esquema para sacudir el balde del LHD, posterior a haberse completado la carga y con objetivo de botar el exceso de material que se haya recogido.
- Dobson & Marshall, para Atlas Copco Rock Drills, 2015 [83]: corresponde a la patente solicitada por el trabajo de las publicaciones referenciadas al final de la Sección 2.3.3, en las cuales se desarrolla un control de admitancia para llevar a cabo la excavación en material fragmentado utilizando las señales de los sensores de presión del cilindro de levante de la máquina, mientras se usa la velocidad del volteo del balde como señal de control. También se describen otros elementos necesarios para la ejecución de una carga autónoma, como es la apropiada aproximación y colisión con la pila de material, así como métodos de adaptación o aprendizaje de las distintas condiciones del medio, los cuales se efectúan a través de modificaciones en valores objetivo de señales, en base a los resultados de las cargas anteriores.

2.4. Esquemas de operación integrados

Debido a que la excavación en una pila de rocas con una máquina de carga frontal corresponde sólo a una parte del proceso de carga y transporte de mineral, el cual es a su vez una porción de las distintas tareas requeridas durante una operación normal, es necesario aceptar que la excavación autónoma debe necesariamente estar inmersa dentro de un esquema de operación integrado, en el cual todas las componentes del sistema sean consideradas, de modo de dividir el desafío de automatización en módulos más pequeños, los cuales puedan luego enlazarse fácilmente.

El desarrollo de software suele dividirse en una serie elementos modulares con el fin de maximizar la utilización del capital humano. La consecuencia de esta política es que luego se requiere un esfuerzo adicional para integrar los distintos componentes y así obtener la versión final del producto. En esta sección se presentan, en forma general, algunos de los conceptos principales que aparecen en el ámbito de la integración de sistemas.

2.4.1. Planificación de la integración

Se requiere integración de software cuando se combinan distintos componentes para conformar un subsistema, o bien cuando se combinan subsistemas para conformar un producto. Los componentes se pueden integrar una vez que todos han sido implementados y probados, aproximación denominada de tipo “big bang”, o bien pueden seguir un modelo de cascada, en el que los elementos o funcionalidades son continuamente incorporados en subproductos funcionales de cada vez mayor complejidad [84]. La integración continua demanda una carga más constante de trabajo, pero a un riesgo mucho menor, gracias a que los desarrolladores tienen una base sobre la cual verificar desempeño y calidad de los nuevos componentes. Por otro lado, también al cliente se le puede ofrecer una demostración funcional del producto en sus etapas tempranas de desarrollo, lo cual permite asegurar que ambas partes tienen la misma visión y expectativas sobre el trabajo a realizar.

La integración también está fuertemente ligada con una planificación acerca de cuáles son las interfaces que definen a los distintos módulos, entendiéndose por interfaz al conjunto de supuestos que cada componente puede asumir de manera segura acerca de otra, y lo cual incluye el comportamiento esperado, los recursos que consume, cómo actúa ante un error, la latencia que añade, los otros módulos de los que depende, etc. Todos parámetros que deben ser considerados al momento del diseño de la arquitectura del software del sistema.

2.4.2. Métodos de integración

Desde el punto de vista de cómo los distintos componentes dependen de otros, se pueden distinguir tres diferentes métodos de integración: vertical, horizontal o estrella [85]. A continuación, se revisan cada uno de estos términos.

Integración vertical: corresponde al proceso de integrar subsistemas de acuerdo a su funcionalidad, mediante la creación de silos informáticos. Esto quiere decir que la relación jerárquica entre los componentes que conforman una funcionalidad les permite agruparse de manera que su interfaz está pensada sólo para atender a las necesidades de los niveles más altos. En el corto plazo el beneficio es que realizar la integración es más rápido, sin embargo, al querer extender o mejorar las funcionalidades, el proceso puede requerir la intervención de todos los módulos que conforman el silo.

Integración horizontal: es un método de integración en el que existe un subsistema especializado (ESB o *Enterprise Service Bus*) en manejar las comunicaciones entre los demás componentes. Esto permite reducir el número de conexiones (interfaces) a sólo una por subsistema, la cual se conecta directamente al ESB. Por su parte el ESB es capaz de traducir entre las distintas interfaces. Todo esto permite reducir en gran parte los costos de integración y provee de una gran flexibilidad al momento de añadir o quitar módulos.

Integración estrella: es un proceso de integración de sistemas en el que cada módulo o componente está interconectado a cada uno de los demás subsistemas. El costo de la integración depende en gran parte de la uniformidad de las interfaces que se consideren y aumenta exponencialmente con cada módulo que se añade. Desde el punto de vista de sus características, este método podría preferirse debido a la extrema flexibilidad en la reutilización de funcionalidades.

2.4.3. Buenas prácticas

Con el objetivo de generar una integración correcta y oportuna, existen una serie de consideraciones que merecen la pena tener en cuenta. A continuación, se listan algunas de ellas:

- Desarrollar un plan de integración de sistema durante la planificación del programa.
- Definir requerimientos, especificaciones de diseño y verificación para cada nivel del sistema.
- Mantener un seguimiento de los requerimientos, especificaciones de diseño y verificación para todos los niveles del sistema.
- Adoptar un modelo de integración continua y un ritmo de integración independiente del equipo de desarrollo.
- Administrar la integración y pruebas del sistema en base a subsistemas que puedan ser testeados de principio a fin, cumpliendo con los requerimientos a nivel de sistema.
- Administrar el diseño y desarrollo en base a componentes que puedan ser desarrollados y verificados en forma independiente.
- Crear un esqueleto de la arquitectura del sistema muy temprano en el diseño del programa y utilizarlo como guía para la integración de subsistemas, a medida que se agregan componentes en forma incremental.
- Desarrollar especificaciones de componentes y subsistemas en la extensión que sea necesaria para definir procedimientos de verificación y entrega.
- Hacer seguimiento del progreso de integración en base a la completitud de subsistemas que hayan sido verificados de principio a fin contra los requerimientos a nivel de sistema.

2.5. Robot Operating System (ROS)

ROS es un meta-sistema operativo de código abierto para robots [86]. Los inicios de su desarrollo datan de finales de 2007. En el año 2010, la primera versión completamente funcional (versión 1.0) fue abierta al público y desde entonces su continuo desarrollo y adopción en el campo de la investigación en robótica le ha permitido consolidarse como la plataforma de desarrollo de software para robots más importante del mundo.

El eje central de ROS es la reutilización y desarrollo distribuido de software, permitiendo que los especialistas de las distintas áreas de la robótica en todo el mundo compartan su trabajo en pos de la creación de robots cada vez más capaces. Por este motivo la integración de sistemas es una parte central de este *middleware*.

El método de integración que utiliza ROS es uno de tipo horizontal. Las distintas funcionalidades o módulos de código se separan en procesos denominados nodos. Luego un nodo, llamado “Master”, es el encargado de gestionar las comunicaciones internodales.

ROS provee una serie de formas para comunicar información entre nodos. Por una parte, cuenta con un servidor de parámetros, parte del nodo “Master”, en el cual se pueden almacenar datos en forma central y accesible para todos los nodos, y por otro lado los distintos nodos se pueden comunicar entre ellos mediante el uso de “mensajes”.

Los mensajes son estructuras simples de datos, compuestos por campos con un tipo definido, tales como enteros, booleanos, punto flotante, arreglos de los mismos y estructuras anidadas, muy similar a como funcionan las estructuras en el lenguaje de programación C. Existen dos formas principales en que los mensajes pueden ser transportados entre nodos: utilizando tópicos o servicios.

En un tópico, los mensajes son transportados utilizando una semántica de tipo publicar y suscribir. Un nodo envía un mensaje al “publicarlo” en un determinado tópico. Por su parte el tópico corresponde a un nombre que es utilizado para identificar el contenido del mensaje. Finalmente, si otro nodo está interesado en el contenido de dicho mensaje, entonces éste se “suscribe” al tópico. Múltiples publicadores y suscriptores pueden existir para un mismo tópico, así como también un mismo nodo puede publicar y suscribirse a diversos tópicos. En general, un publicador no está al tanto de la existencia de un suscriptor y vice versa, desacoplando de esta manera la producción y el consumo de la información.

Los servicios implementan un paradigma de comunicación distinto al de los tópicos. En los servicios la interfaz es de tipo pregunta/respuesta, existiendo una estructura de datos independiente para cada una de ellas. El nodo que provee de un servicio, lo ofrece mediante un nombre particular. Por otro lado, el cliente usa el servicio enviando un mensaje de solicitud y esperando por la respuesta, es decir, la ejecución del código del cliente permanece bloqueada entre la llamada al servicio y el instante en que obtiene la respuesta.

Las características anteriores de una estructura de comunicaciones entre procesos completamente implementada, sumadas a la facilidad de acceso a una gran cantidad de funcionalidades y herramientas ya implementadas para ROS, lo convierten en un sistema de extrema utilidad en el desarrollo de soluciones para la robótica.

Capítulo 3: Metodología y lineamientos de desarrollo

Para lograr los objetivos propuestos en esta tesis de magíster, se dividirá el desarrollo en dos etapas. En una primera parte se trabajará con prototipos de laboratorio y conocimientos de operadores expertos para establecer las bases del algoritmo de carga autónoma y su integración dentro del marco de la operación minera subterránea. En la segunda etapa se procederá a las pruebas, ajustes y validación de los desarrollos en terreno y bajo condiciones reales, limitado al alcance de la disponibilidad de infraestructura.

Lo anterior se describe con más detalle en las siguientes subsecciones.

3.1. Infraestructura y equipos

3.1.1. Prototipo de laboratorio

Para la primera fase de desarrollos, se trabajó en el Laboratorio de Robótica de Campo del AMTC de la Universidad de Chile. En el *Advanced Mining Technology Center* (AMTC) se contó con acceso a un modelo a escala 1:5 de un LHD de 7 toneladas, el cual, con la ayuda de otros miembros del Laboratorio de Robótica, fue sensorizado y provisto de la electrónica necesaria para la recolección y transmisión de datos, así como el control de los actuadores (Figura 1). Específicamente el equipo cuenta con tres cilindros hidráulicos para las articulaciones de dirección, brazo (levante) y balde (volteo), como se puede apreciar en la Figura 2, potenciados por una bomba hidráulica de 150 bar; sensores de presión en ambos extremos de los cilindros de levante y volteo; tres motores eléctricos para la tracción, uno en cada rueda delantera y otro acoplado a un diferencial para las ruedas traseras; sensores de corriente para cada uno de los motores; sensores tipo encoder para medir el ángulo de las articulaciones; una unidad de procesamiento tipo Arduino, modelo DUE, encargada de recopilar la información sensorial y enviar los comandos a los actuadores; y una unidad de procesamiento Raspberry PI, cuyo objetivo es implementar la comunicación de alto nivel de la máquina, generando una interfaz entre el bajo nivel (Arduino) y un PC externo, conectado por red, que ejecuta las rutinas y algoritmos más complejos.

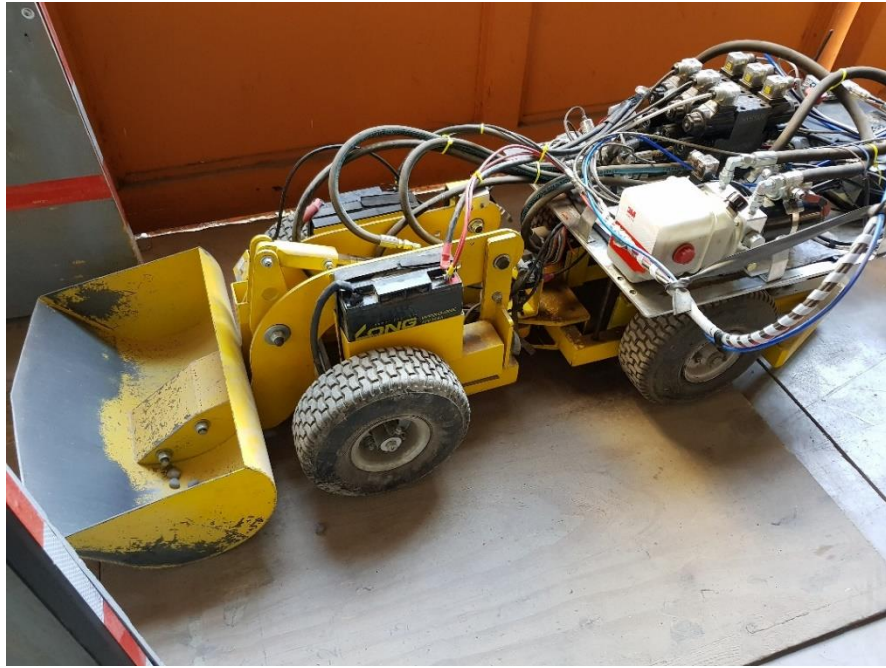
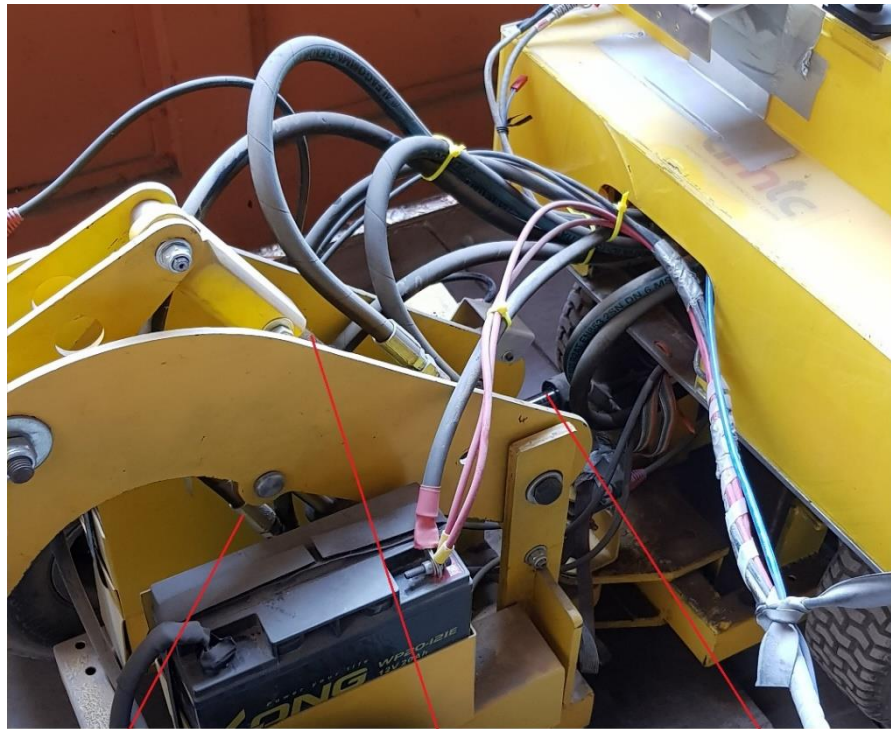


FIGURA 1: PROTOTIPO DE LABORATORIO DE LHD, ESCALA 1:5.



Cilindro de levante

Cilindro de volteo

Cilindro de dirección

FIGURA 2: CILINDROS Y ARTICULACIONES DE LEVANTE, VOLTEO Y DIRECCIÓN.

El PC externo y el Raspberry PI corren un sistema operativo Linux (Ubuntu 14.04) y utilizan la versión Indigo de ROS (*Robot Operating System*). El código se encuentra programado principalmente en lenguaje C++, con algunas implementaciones en Python.

Adicionalmente al equipo LHD a escala, se cuenta con un punto de extracción, diseñado y construido por integrantes del AMTC, el cual ha sido cargado con rocas, conformándose granulometrías tanto homogénea como heterogénea a través del tiempo, tal como se puede apreciar en la Figura 3.



FIGURA 3: PUNTO DE EXTRACCIÓN A ESCALA CON GRANULOMETRÍAS HOMOGÉNEA (IZQUIERDA) Y HETEROGÉNEA (DERECHA).

Por último, un componente de incorporación reciente, es un tecele anclado a la estructura del punto de extracción y enganchado a una rampa móvil, con lo cual el LHD a escala puede descargar el material recogido en la rampa, para luego ser devuelto al punto desde arriba (ver Figura 4).



FIGURA 4: RAMPA CONSTRUIDA SOBRE PUNTO DE EXTRACCIÓN PARA CIRCULAR MATERIAL EXTRAÍDO.

3.1.2. Pruebas a escala real

Para el trabajo en terreno se contó con una máquina LHD de tamaño real de la empresa GHH, modelo LF11H, como la que se muestra en la Figura 5. Esta pala se equipó especialmente con sensores de diversa índole, de los cuales, para la carga autónoma, fueron de especial interés los sensores de presión en los cilindros de levante y volteo, así como un encoder rotacional y sensor de distancia láser para medir la inclinación y extensión del cilindro de volteo. En cuanto al *hardware* de procesamiento, la máquina contaba un PLC propio, al cual se le sumó un computador industrial con sistema operativo Linux (Ubuntu 14.04) y ROS Indigo, el cual fue utilizado para ejecutar todo el software de automatización desarrollado.



FIGURA 5: LHD MARCA GHH MODELO LF11H

Para la realización de las pruebas, se contó con el apoyo de la Compañía Minera San Gerónimo (CMSG), cuya faena se ubica en el sector de Talcuna/El Molle, Región de Coquimbo, Chile. La CMSG facilitó dentro de sus instalaciones un terreno en superficie, para pruebas preliminares, y un túnel con su correspondiente punto de extracción de mineral para las pruebas finales.

3.2. Entrevista y obtención de conocimiento experto

La información obtenida durante el proceso de investigación acerca de las operaciones de carga de mineral con máquinas LHD en minería subterránea se obtuvo desde fuentes tanto primarias, como secundarias. Las fuentes secundarias abarcan la información presentada en la revisión bibliográfica del Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo el trabajo realizado por Joshua Marshall en [4], y las publicaciones científicas derivadas, las más valiosas desde el punto de vista de exponer la automatización de la carga con máquinas LHD reales. Por ejemplo, en sus artículos se expone como durante el proceso de carga, las señales de esfuerzo de la máquina (principalmente presión de los cilindros de la pala) marcan claramente tres fases: aproximación hacia la roca, excavación, y retirada. Un análisis más cuidadoso de dichas publicaciones también permite inferir la importancia del esfuerzo que realiza la pala contra la roca y su necesidad de controlarlo. Otro de los documentos más relevantes para este estudio fue un informe acerca de la operación de LHD, realizado para uso interno por la minera estatal CODELCO [2]. En el cual se describen las diversas actividades que diariamente se deben realizar durante los turnos de operación, lo cual permitió comprender en mayor profundidad las tareas y dificultades con las que debe lidiar el operario.

Respecto de las fuentes primarias de información, éstas se refieren al conocimiento adquirido de conversaciones directas con operadores de las máquinas, las cuales se realizaron en dos modalidades: conversaciones informales y una entrevista. La entrevista realizada fue al instructor de operadores de LHD, el señor Pablo Chávez, de la División El Teniente, CODELCO. Las notas y reporte asociado se adjuntan en los anexos. Por otra parte, las conversaciones informales no dejaron registro escrito, pero permitieron contrastar y verificar las nociones de la operación

minera adquiridas con anterioridad desde las diversas fuentes, así como comprender las semejanzas y diferencias en el relato de cada uno respecto al proceso de carga de mineral. Estas conversaciones se dieron en forma breve con asistentes de la feria ExpoMin 2016 y más extensamente con dos operadores de la Compañía Minera San Gerónimo (CMSG), minera que facilitó las instalaciones para las pruebas a escala real. Respecto de la cantidad de personas consultadas, se considera que esta fue suficiente, a pesar de que el número no sea muy elevado. El motivo de ello, es que, en general, los relatos no varían demasiado, salvo por la técnica utilizada específicamente para controlar el balde durante la excavación, como se explica más adelante.

Conjugando las diversas fuentes anteriormente mencionadas, y relativo al panorama global y tareas que se realizan con la máquina, se tomó conocimiento de que el ciclo de carga-transporte-descarga constituye sólo una parte de la operación, siendo el resto del tiempo utilizado en actividades habilitadoras del proceso, las cuales varían dependiendo del método de explotación de mineral y escala del proyecto minero, pero que siempre consideran: mantención de la infraestructura, como limpieza de calles (recoger piedras en la sección del túnel cercana al punto de extracción) o construcción de barreras para cierre temporal de túneles peligrosos (en faenas tipo Block Caving); y transporte de rocas demasiado grandes para la siguiente fase de transporte (camión, buzón, etc.), pero que se pueden cargar en el balde del LHD. Estas colpas, son usualmente depositadas temporalmente en otra sección de la mina hasta que puedan ser tronadas.

Otro de los factores organizacionales del que se tomó conciencia fue que la planificación de la extracción de mineral está moderada por el “jefe de turno”, quien se encarga de hacer cumplir el plan minero desarrollado por los ingenieros, indicando a los operadores de LHD de qué sectores tienen que extraer en todo momento.

Respecto del proceso de carga en sí mismo, se pudo identificar que el primer paso de la maniobra, anterior a la aproximación o embestida contra la roca, corresponde a la evaluación de las características visuales del punto de extracción. Según la entrevista realizada, el factor más relevante es si el punto se encuentra habilitado para la operación, es decir, que no presente rocas demasiado grandes para intentar cargarlas con la máquina, y que sea seguro (sin presencia de escurrimiento de barro en operaciones de Block Caving, riesgo de planchoneo o desprendimiento de roca en Sublevel Stopping, etc.). Factores como la distribución o granulometría del punto no afectan la decisión del operador, aunque bajo ciertas condiciones (y métodos de explotación) la pendiente del mineral apilado si se toma en consideración, puesto que se considera para determinar la presencia de una colgadura (mineral atascado, no fluye tras una extracción).

Finalmente, respecto de la carga de mineral propiamente, se descubrió que los operadores de por sí, no tienen una estrategia preconcebida o dictada respecto de cómo se ejecuta. Todos los operadores a los que se inquirió, respondieron que, para lograr cargar completamente el balde, la experiencia es el factor más importante. No obstante lo anterior, se pudo extraer algunas piezas clave comunes para todos ellos:

1. La aproximación hacia la pila de mineral se hace con el balde a ras de piso, con el cambio de la tracción en primera (para máquinas con caja de cambios) y el motor forzado al máximo.
2. La carga se realiza con el LHD derecho (articulación central alineada).

3. Durante la carga el movimiento principal que se usa es el volteo del balde, el cual se acciona en forma pulsante (on/off), a pesar de que la hidráulica permite un control más suave.
4. Para controlar el derrape de las ruedas, y por lo tanto la tracción del vehículo, suele utilizarse el movimiento de levante para aumentar la carga sobre las ruedas.
5. El movimiento del balde es fundamental para la penetración en la roca. Si el balde no se mueve, la máquina eventualmente patinará, sin conseguir desplazarse, gastando petróleo y durabilidad de los neumáticos.

3.3. Carga autónoma

De acuerdo a la información recopilada, resumida en la sección anterior y desarrollada en extenso en la revisión bibliográfica y anexos, es posible entender que el proceso de carga de material puede subdividirse fundamentalmente en cuatro etapas:

1. Evaluación del punto de extracción.
2. Aproximación a la pila de material.
3. Excavación o llenado del balde.
4. Retirada.

La primera fase, “Evaluación del punto de extracción”, considera una inspección de las características visuales de la pila, tales como presencia de rocas de gran tamaño, distribución del material y pendiente u otros indicadores de estabilidad, dependiendo del tipo de explotación del yacimiento (por ejemplo, en “block caving” la pendiente es un indicador de estabilidad, mientras que en “sublevel stoping” esto se relaciona con la firmeza del techo del caserón). El motivo de que la caracterización sea sólo a nivel visual es una consecuencia de lo expuesto en la Sección 2.3.1: debido a la complejidad de las interacciones inter-granulares, no es posible saber de antemano la dificultad que presentará la interacción con la roca. Por la misma razón es que cargar material en distintos puntos de extracción representará diferentes desafíos, y más aún si el método de explotación cambia. Es esta gran variabilidad del proceso de carga la que dificulta que una estrategia autónoma sea capaz de superar todas las situaciones posibles, por lo que, en un escenario realista, sería esperable que un cargador autónomo sólo pueda cumplir exitosamente su objetivo en un porcentaje de los casos, requiriendo que un operador humano experto se encargue de los demás.

La segunda fase, “Aproximación a la pila de material”, presenta dos desafíos. El primero es que el balde debe llegar a ras de piso justo antes de encontrarse con el mineral apilado, pero asegurando que la punta o “cuchilla” del balde no se entierre en el camino, por ejemplo, debido a irregularidades en la superficie. El segundo desafío es que se debe poder determinar el momento en el que el balde de la máquina comienza a penetrar en la roca, de modo de establecer el inicio de la siguiente fase.

La “Excavación” o “Llenado del balde”, podría considerarse como el componente fundamental del proceso de carga, pues es el que se alinea directamente con el objetivo del proceso completo. Es en esta etapa donde no existe un consenso entre los operadores de la maquinaria acerca de la mejor estrategia a utilizar, aunque se pudo identificar la necesidad de un movimiento persistente del balde una vez dentro de la roca. Éste puede detenerse brevemente, pero necesariamente debe volver a entrar en movimiento tras un espacio corto de tiempo. Además, tanto de los experimentos realizados en los trabajos de Joshua Marshall, como del conocimiento adquirido de los operadores, se puede inferir que principal objetivo de una buena estrategia de excavación es

mantener la tracción del vehículo mientras se avanza con el balde dentro de la pila de material, es decir, controlando la fuerza de resistencia al movimiento y roce con el suelo. En el caso de los experimentos de Marshall, esto se realiza utilizando el cilindro de levante de la pala como un sensor, y accionando el volteo para mantener la presión sobre el primero constante. En el caso de los operadores entrevistados, ellos utilizan directamente el levante para aumentar la carga del vehículo, disminuyendo así el resbalamiento sin necesidad de acortar el rango efectivo de excavación con el movimiento de volteo. Esta maniobra tiene, según la información recabada, una dificultad altamente variable, que dependerá en general de la granulometría, humedad, grado de compactación, distribución y pendiente del material rocoso, así como también de las características del terreno, que afecta la tracción de la máquina.

Finalmente, la “Retirada” consiste en extraer el balde de la roca, sacudir cualquier exceso que pudiese caer durante el transporte, llevar la pala a la posición de transporte y salir del punto de extracción.

3.4. Modelo de integración

Los trabajos publicados en la literatura suelen abordar en forma independiente los distintos componentes de automatización de las máquinas LHD. Incluso dentro de la misma tarea de la carga autónoma, la mayoría de las publicaciones sólo considera la etapa de excavación, es decir, los movimientos necesarios de la pala para llenar el balde, una vez que ya se encuentra dentro de la pila de material [63] [66] [70]. Por otro lado, otros estudios se han enfocado en la caracterización visual del mineral a cargar [55] [87] [88]. Y, por supuesto, todas las soluciones al problema de la navegación autónoma han sido desarrolladas con total independencia de las demás tareas que realiza la máquina, muchas de las cuales no tienen aún solución autónoma, siendo sólo algunos ejemplos de ellas: la carga de petróleo, el transporte de rocas demasiado grandes para seguir la cadena de procesamiento, limpieza de calles y otras mencionadas en la Sección 2.1.2. En este trabajo, se pretende entregar algunos lineamientos y esquemas conceptuales para sentar las bases de la integración de los diferentes componentes de software necesarios para una operación autónoma exitosa. Si bien no todos los conceptos propuestos son llevados a la implementación, estos sí se mantienen en consideración dentro de los métodos programados.

Para conseguir una operación integral, que considere todas las necesidades que exige una faena minera de un equipo LHD, es necesario un profundo entendimiento del uso de la máquina y del funcionamiento y planificación de la explotación de un yacimiento, así como también de la aceptación de la importancia que tiene el integrar a los operadores humanos en el proceso, para superar las falencias actuales de la capacidad autónoma, y asegurar así una operación continua y robusta.

En particular en la presente tesis, se proponen dos niveles de integración en el sistema, el primero considera presentar un modelo para unificar la evaluación del punto de extracción con la carga autónoma, y el segundo integrar el proceso de carga con la navegación y las tareas adicionales que deben realizarse con la máquina.

Capítulo 4: Propuesta de modelo de integración

El modelo de integración del nivel operativo global de la máquina LHD requiere, primero que todo, la existencia de un conjunto de entidades con roles definidos. En particular, en esta tesis, se proponen cuatro entes: planificador de corto plazo, control de flota, coordinador y controlador, los cuales se ilustran en el Diagrama 2.

El planificador de corto es el encargado de preparar la rutina diaria de extracción de mineral, indicando de qué lugares se debe extraer y dónde se debe botar. El control de flota es el organismo encargado de velar por que la planificación se cumpla lo mejor posible, intercediendo para superar contingencias y pudiendo afectar directamente las tareas asignadas a cada máquina. Estos dos roles superiores son usualmente asignados a humanos y tienen relación con la operación a nivel central. En el caso particular del control de flota, existe software comercial para asistir a su automatización, sin embargo, requiere de un humano para supervisar y asistir frente a contingencias. Por otra parte, los dos niveles inferiores (coordinador y controlador) se ejecutan en forma local para cada máquina automatizada. El coordinador actúa como un moderador del control de la máquina, cumpliendo la función de habilitar o suprimir las acciones sobre el LHD de los distintos módulos controladores, dependiendo del modo de operación de la máquina. Por último, los módulos controladores mencionados, son cualquier entidad que intente influir directamente en los actuadores de la máquina, es decir, tanto un módulo de software para comportamiento autónomo, como un operador o teleoperador humano, por lo mismo, muchos controladores pueden existir para un solo equipo.

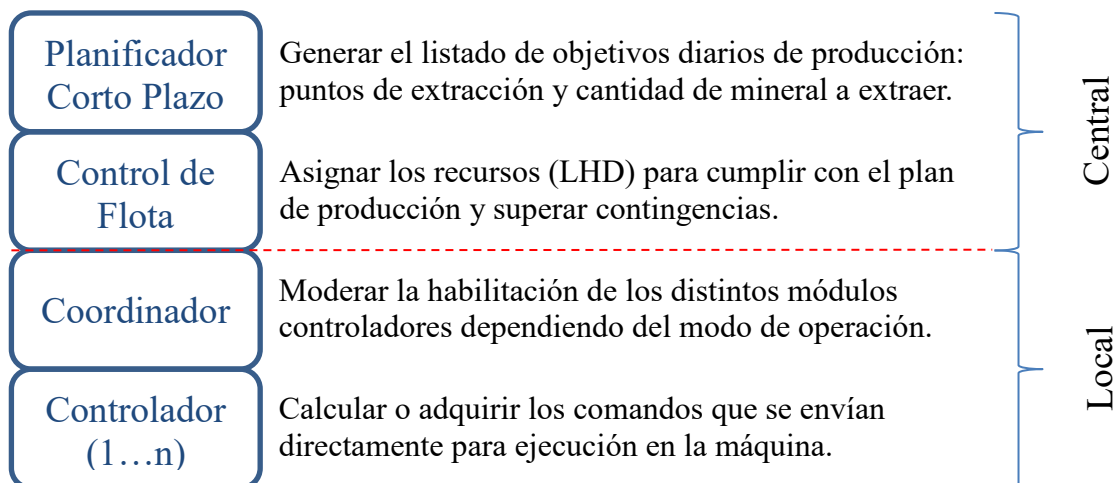


DIAGRAMA 2: JERARQUÍA Y ROLES DE ENTIDADES NECESARIAS PARA OPERACIÓN INTEGRAL DE LHD.

Un ejemplo de coordinador se presenta en el Diagrama 3, el cual no necesariamente se sugiere como una implementación de dicho coordinador, sino que sólo pretende ilustrar distintos modos de operación, cada uno de los cuales podría intentar controlar el equipo en determinado momento. Así, sólo si el estado del coordinador se alinea con el módulo de software que envía los mensajes de comando al LHD, éstos tendrán efecto en los actuadores. El estado base del coordinador “Obtener Tarea” puede entenderse como un “Idle” de la máquina, en el cual ningún control sobre la máquina será aceptado. Dicho esto, las tareas se definen explícitamente como “Navegar”, “Cargar”, “Descargar” y “Otras Tareas Teleoperadas”, donde las tres primeras poseen estados duales que separan el comportamiento autónomo y teleoperado. Las transiciones directas entre estos estados duales están permitidas, dado que el estado autónomo podría requerir asistencia de un teleoperador humano. Por el contrario, las transiciones entre distintas tareas

deben pasar por el estado “Obtener Tarea”. El motivo de esto último, es que la asignación secuencial de las tareas debiese provenir del supervisor, guiándose por los lineamientos del ente planificador. El control y priorización de la asignación de tareas, sin embargo, queda fuera de las responsabilidades del coordinador y, en general, el software debiese estar programado considerando siempre que una toma de control manual tiene prioridad por sobre una teleoperada, la cual a su vez tiene prioridad por sobre una autónoma y que las transiciones de las distintas máquinas de estados o procesos implementados debiesen ser instantáneas frente a estas solicitudes. Del mismo modo, una parada de emergencia, independientemente de la forma en la que sea generada, debe tener prioridad por sobre cualquier otra acción.

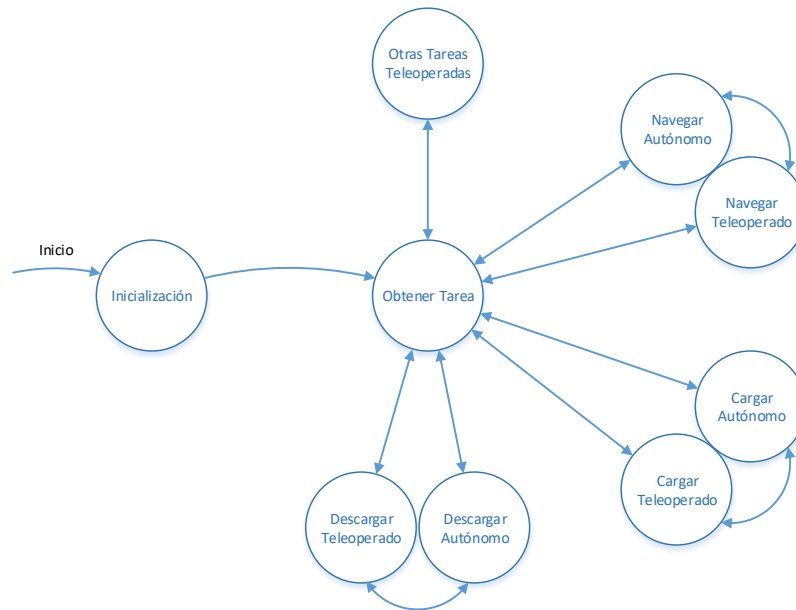


DIAGRAMA 3: ENTE COORDINADOR.

Una vez establecida la existencia del ente coordinador, el siguiente paso consiste en explicitar un modelo de estados y transiciones que asegure una operación autónoma continua, dentro del ciclo de extracción de mineral, es decir, un controlador autónomo. En el Diagrama 4 se propone una alternativa, fundada la secuencia usual de tareas de un LHD, pero con énfasis en el proceso de carga, donde se ha separado la etapa de evaluación del punto de extracción de las demás (aproximación, excavación y retroceso), agrupadas bajo “carga autónoma”. Adicionalmente se incluyen estados de teleoperación y reintento, lo cual se justifica para asegurar una adecuada integración con la supervisión y operación remota por parte de un operador, en caso de que el sistema autónomo no pudiese completar alguna tarea. Como se puede observar, la extracción de mineral comienza con la navegación hacia el punto de extracción o “zanja” seleccionada. Una vez alcanzado el destino asignado, el módulo de carga de mineral toma el control de la máquina. Luego, el primer paso consiste en la evaluación de la zanja, si las condiciones de la pila de rocas son aptas, entonces se procede a la carga autónoma, pero si se detecta algún tipo de condición compleja, se solicita inmediatamente al operador que tome el control remoto de la máquina y cargue en forma teleoperada. Es debatible si acaso el operador debiera ser capaz de reevaluar las condiciones del punto de extracción y reasignar la tarea de cargar al módulo autónomo. Si bien esta situación pudiese ser deseable en el periodo de calibración del caracterizador, es de suponer que una vez afinado, éste debiese ser capaz de diferenciar con mayor exactitud las condiciones bajo las cuales la carga autónoma no tendría éxito, por lo que, una vez transferido el control al operador, las únicas alternativas del mismo son cargar el mineral o indicar que la maniobra no es

posible, incluso en forma teleoperada. Para el módulo de carga autónoma, por otro lado, sus opciones de resultado son: que logre llenar el balde; que reconozca que, por condiciones internas de la pila de rocas, su algoritmo de carga no le permita tener éxito, instancia en la cual se solicita a un humano realizar la carga en forma teleoperada; o que en el primer intento no logró llenar el balde lo suficiente y solicite un reintento.

En cualquier caso, si las condiciones de la zanja no permiten extraer mineral, la tarea de cargar es abortada y las acciones consecuentes deberán ser asignadas desde el módulo de control de flota. Por otra parte, si se logra llenar el balde, la siguiente acción debería ser navegar al pique de descarga o punto de acopio.

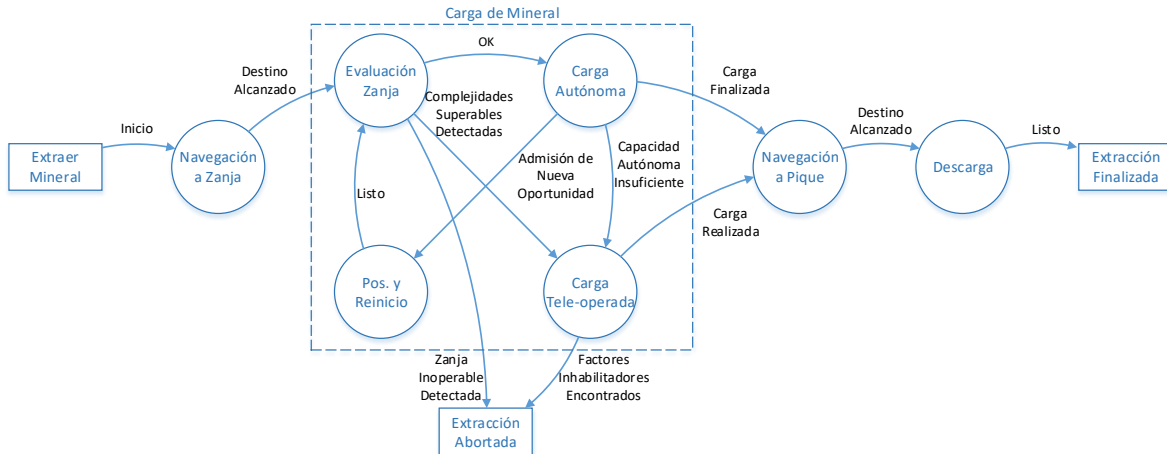


DIAGRAMA 4: ENTE CONTROLADOR.

Capítulo 5: Implementación carga autónoma

Una vez establecidos los lazos que unen las distintas actividades de la operación subterránea con máquinas LHD, el siguiente paso y foco principal de esta tesis, consiste en ahondar en el algoritmo de “Carga Autónoma”. En las siguientes secciones se presenta el desarrollo del modelo y la implementación del sistema, el cual es concebido con una estructura que permita una integración directa, es decir, si bien no se logra desarrollar el sistema completo, sí se implementan todas las interfaces para que las funcionalidades restantes (navegación autónoma, caracterización/evaluación de la zanja, control teleoperado, etc.) se puedan incluir de forma sencilla.

5.1. Modelo conceptual

El Diagrama 4 enfoca la tarea que se ha denominado “Carga de Mineral”, dentro de ella, uno de los estados es la carga autónoma, cuyo esquema detallado se puede apreciar en el Diagrama 5. Como se puede ver, este módulo comienza con la aproximación a la pila de rocas, una vez que se detecta el contacto con el balde se procede a la secuencia de excavación, la cual es el núcleo del sistema de carga autónoma. Si la aproximación falla o el método de excavación definido no logra recoger suficiente mineral, el sistema genera una solicitud de asistencia para un operador humano quien, de acuerdo con el Diagrama 4, puede decidir si reintentar la operación autónoma o hacer la carga en forma teleoperada. Si, por otra parte, la excavación autónoma logra llenar el balde, entonces se procede a retirarlo de la zanja e iniciar la navegación al punto de descarga.

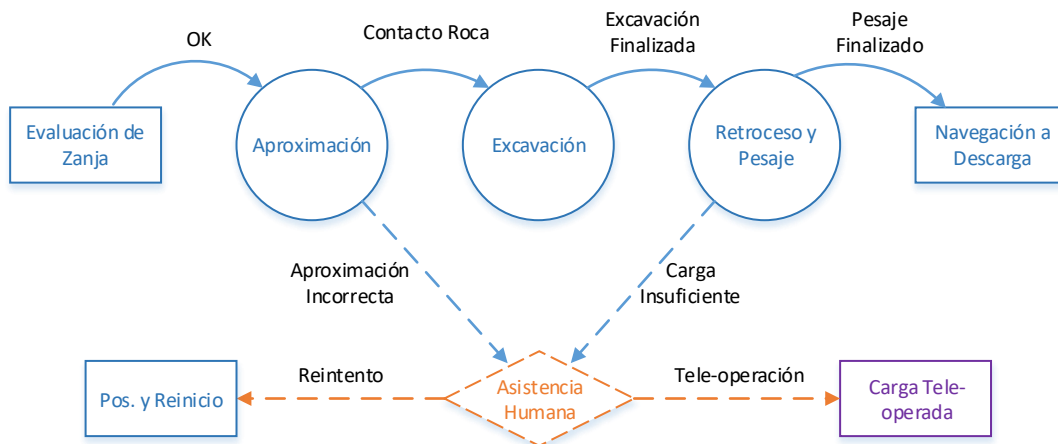


DIAGRAMA 5: MODELO CONCEPTUAL PARA LA “CARGA AUTÓNOMA”.

5.2. Análisis de excavación con operador humano

Según la hipótesis de este trabajo, es posible plasmar el conocimiento de un operador humano en un conjunto de reglas que permitan llevar a cabo la excavación de forma autónoma. Por esta razón, y de modo de idear un algoritmo, se procede a analizar una serie de variables, consideradas como relevantes para este proceso, durante una carga realizada por un operador, tanto para el prototipo de laboratorio, como para la máquina LHD real.

La Figura 6 muestra la gráfica durante un proceso de carga teleoperada para el prototipo de laboratorio, ejecutado por el autor de esta Tesis después un extenso período de práctica y cuyo resultado se ilustra en la Figura 7. Las variables estudiadas corresponden a:

- Levante: accionamiento del cilindro de levante del mecanismo de carga frontal.

- Volteo: accionamiento del cilindro de rotación del balde.
- Pedal: señal de aceleración de los motores de la máquina.
- Corriente M1: corriente del motor trasero del prototipo.
- Ángulo Volteo: ángulo de rotación del balde respecto del brazo del mecanismo frontal de carga.
- Derrape: señal binaria que se activa cuando la diferencia de velocidades de las ruedas delantera y trasera crece por sobre un umbral definido.

Por otra parte, la Figura 8 grafica las variables en el caso de una carga con el LHD a escala real, ejecutada por un operador de la CMSG. El resultado se muestra en la Figura 9 y en este caso las variables involucradas son:

- Levante: señal proporcional de apertura de la válvula del cilindro de levante del mecanismo de carga frontal.
- Volteo: señal proporcional de apertura de la válvula del cilindro de rotación del balde.
- Pedal: señal de aceleración del motor de la máquina.
- P. Transm.: presión de la transmisión hidráulica del vehículo (función de la potencia del motor).
- Ext. Volteo: extensión del cilindro de volteo.
- Derrape: índice calculado en base a la diferencia del movimiento de las ruedas con la velocidad real del vehículo estimada mediante sensores LIDAR.

Se puede notar que los gráficos obtenidos son muy similares. Si bien las variables no son exactamente las mismas, debido a las diferencias entre los vehículos, la “Corriente M1” del prototipo y “P. Transm.” del LHD real, ambas reflejan la potencia del motor principal de la máquina. Se puede notar como justo antes de comenzar la fase de excavación estas señales crecen en respuesta a la colisión entre la máquina y la pila de rocas. En el caso de las variables de control de la articulación de carga, denominadas “Levante” y “Volteo”, resulta evidente que el principal componente de la estrategia de carga consiste en un movimiento pulsante de retracción del balde a través del accionamiento del “Volteo”, lo cual es consistente con los resultados de las entrevistas realizadas a operadores y resumidas en la Sección 3.2. Para el prototipo de laboratorio esta variable de volteo sólo puede tomar los valores 0 o 1 y, si bien para el LHD real ésta tiene un rango continuo entre 0 y 1, el operador la acciona en forma pulsante llevándola siempre hasta su valor máximo. El objetivo del uso del “Levante”, por otra parte, no resulta completamente claro de los gráficos, pero a partir de entrevistas realizadas con distintos operadores, se pudo establecer que esta variable es comúnmente utilizada para controlar el derrape de las ruedas delanteras del LHD. Si éstas comienzan a deslizarse, la acción de levantar el mecanismo frontal de carga genera un mayor peso sobre el tren delantero, aumentando en consecuencia la tracción del mismo.

En el caso del “Pedal” resulta claro que la técnica utilizada por los operadores es llevarla a su valor máximo durante el proceso de carga. Finalmente, el ángulo de volteo del balde o extensión del cilindro de volteo para el LHD real se grafican únicamente como referencia del movimiento del balde durante el proceso.

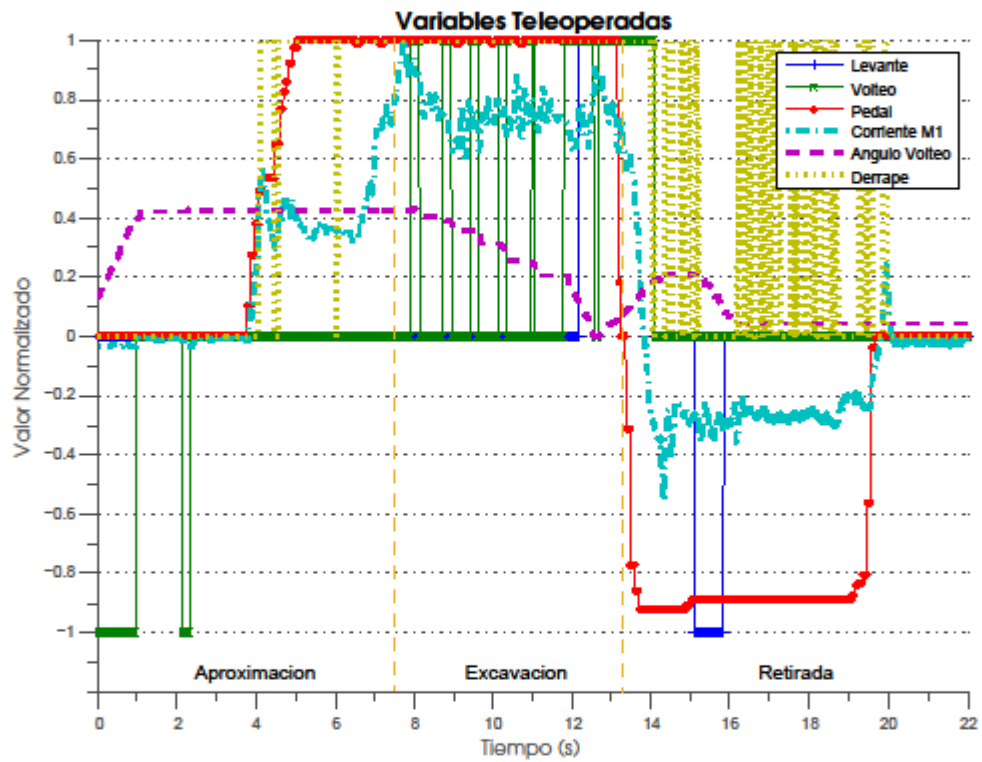


FIGURA 6: VARIABLES CARGA TELEOPERADA PARA PROTOTIPO DE LABORATORIO: LEVANTE, VOLTEO, PEDAL, CORRIENTE DE MOTOR TRASERO, ÁNGULO DEL BALDE Y DERRAPE DE LAS RUEDAS.



FIGURA 7: RESULTADO DE CARGA TELEOPERADA PARA PROTOTIPO DE LABORATORIO.

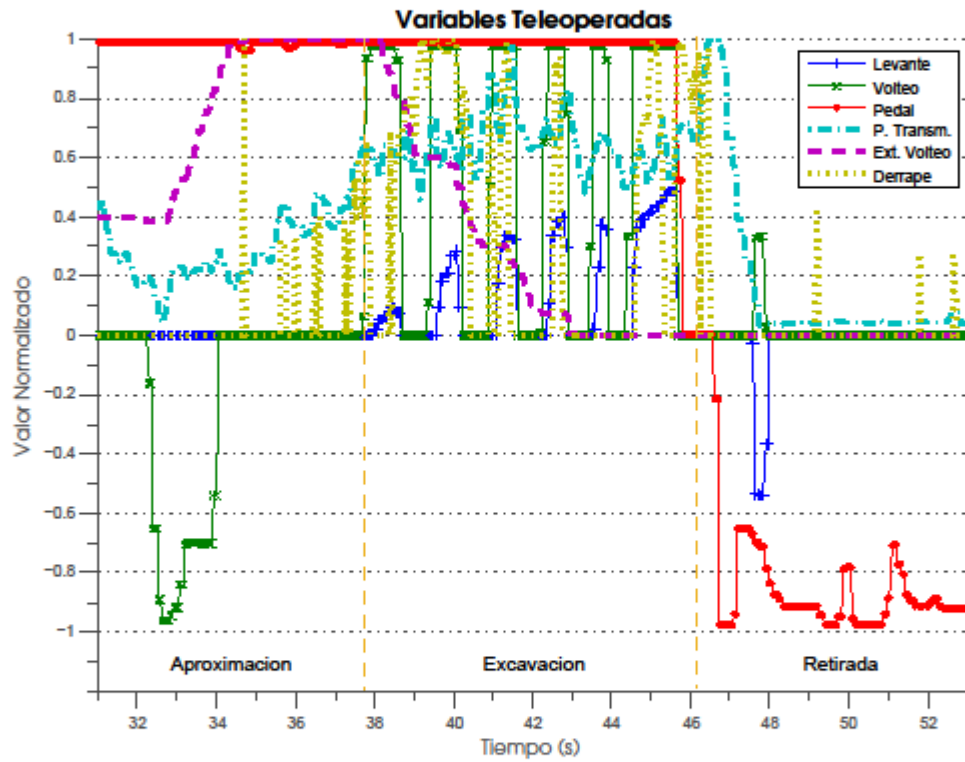


FIGURA 8: VARIABLES CARGA TELEOPERADA CON LÍNEA DE VISTA PARA LHD REAL: LEVANTE, VOLTEO, PEDAL, PRESIÓN DE TRANSMISIÓN HIDRÁULICA, EXTENSIÓN DE CILINDRO DE VOLTEO Y DERRAPE.



FIGURA 9: RESULTADO CARGA TELEOPERADA CON LÍNEA DE VISTA PARA LHD REAL.

5.3. Algoritmo de excavación autónoma

Respecto del algoritmo específico del estado de excavación, la investigación realizada (tanto la revisión bibliográfica, entrevistas con operadores y análisis de cargas manuales) entrega, en forma subyacente, que la respuesta para una carga exitosa se encuentra en mantener la tracción del vehículo mientras el balde penetra en la pila de rocas, por lo que es necesario que el derrape de las ruedas se mantenga controlado, para lo cual extender el cilindro de levante (levantar el balde) se presenta como la mejor variable de control, ya que al aumentar la carga sobre el tren delantero, disminuye la posibilidad de deslizamiento. Con este objetivo, se propone una estrategia, detallada en el Diagrama 6 y la cual pretende intentar emular el comportamiento de un operador humano. Es importante mencionar que el método propuesto, es el primero basado en comportamiento humano que se ha implementado y probado en una máquina LHD real en un ambiente de producción, de acuerdo a la información disponible en la literatura.

Según se ilustra en el Diagrama 6, la excavación se inicia ajustando la transmisión para obtener la mayor fuerza de los motores (cambio en primera para una máquina con caja) y luego se comienza con el avance. El flujo del sistema continúa verificando si se cumple alguna condición de término para la excavación, las cuales pueden ser, pero no se limitan a:

- El balde se ha retraído completamente.
- El balde se levantó hasta la máxima altura permitida.
- La máquina se desplazó una distancia predefinida desde el comienzo de la excavación (asegura que los neumáticos no se dañen por el contacto con la roca).
- Se alcanzó el tiempo máximo permitido para la operación.

De no gatillarse una condición de término, entonces el algoritmo continúa excavando, para lo cual monitorea una estimación del derrape de las ruedas, que determina si acaso es necesario levantar levemente la pala para aumentar la tracción o, por el contrario, se prosigue únicamente con movimientos de volteo pulsantes, tal como lo haría un operador humano.

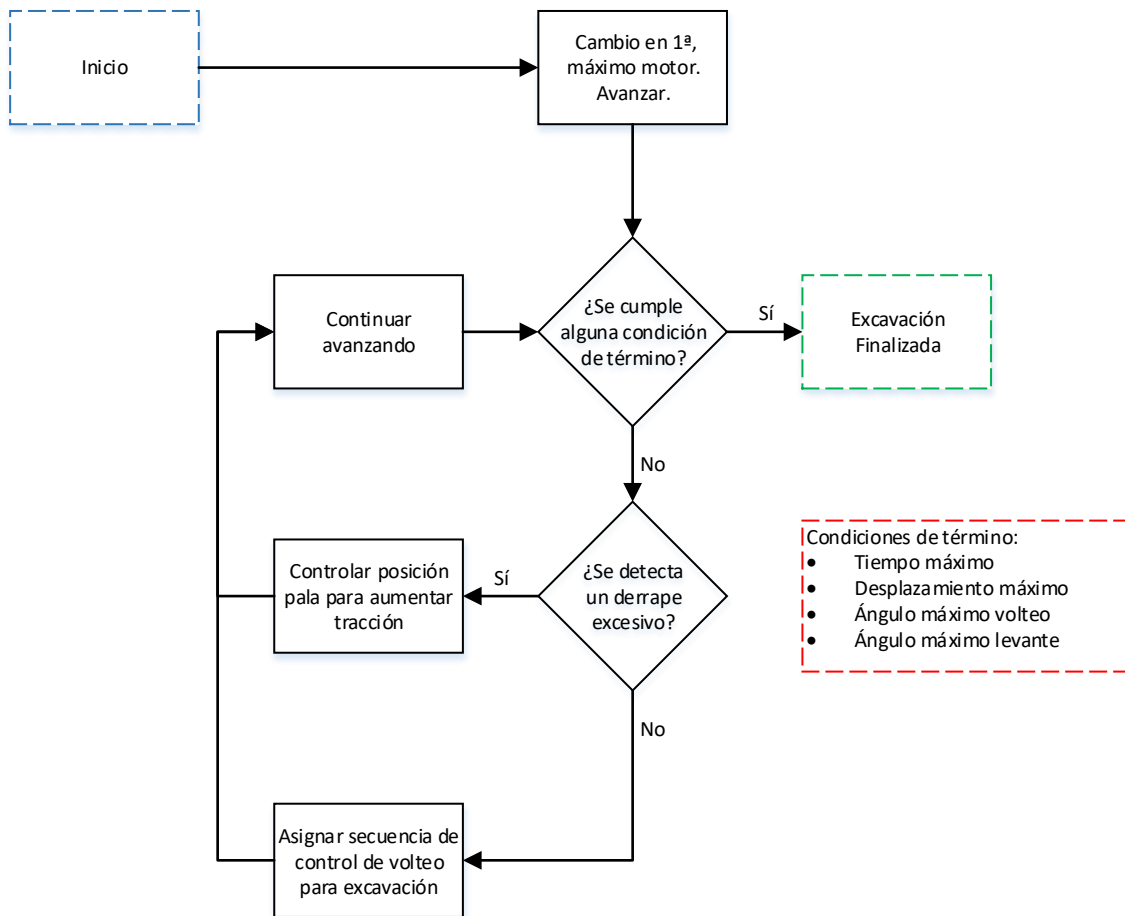
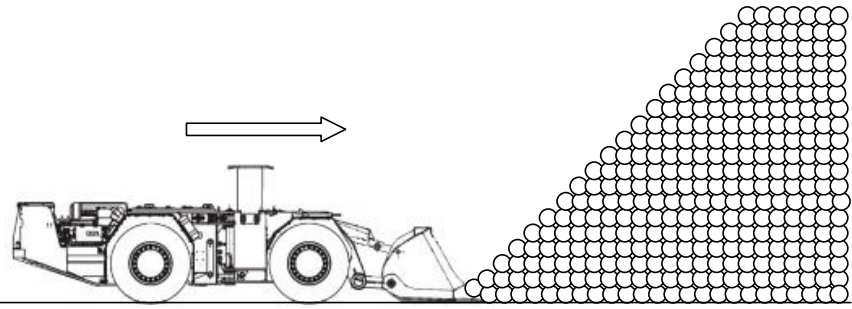


DIAGRAMA 6: FLUJO DEL ALGORITMO DE CARGA AUTÓNOMA.

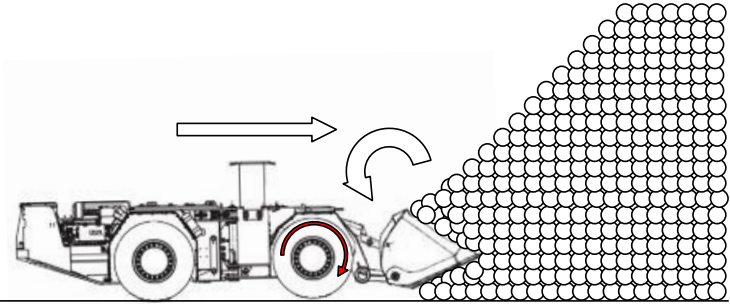
Un ejemplo ilustrativo de las distintas fases del proceso de excavación se muestra en la Figura 10, mientras que los detalles específicos de implementación se explican más adelante, en la Sección 5.4.3.

En la parte a) de la Figura 10, el LHD colisiona contra la pila de rocas, lo cual da inicio a la secuencia de excavación. En b) la máquina empuja contra la pila de rocas y se controla el balde únicamente con movimientos de volteo, esto podría ocasionar una pérdida de tracción del tren delantero, haciendo derrapar las ruedas. En esta situación, el algoritmo pasaría al caso indicado en la parte c), en que el LHD continúa empujando contra la pila, pero en este caso se acciona únicamente el movimiento de levante del balde, aumentando el peso sobre el tren delantero y, de esta forma, reduciendo el derrape. Las etapas b) y c) seguirán alternándose hasta que finalice la excavación, situación ilustrada en la parte d).

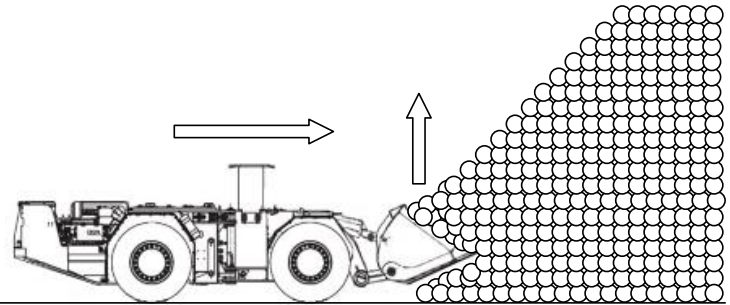
a)



b)



c)



d)

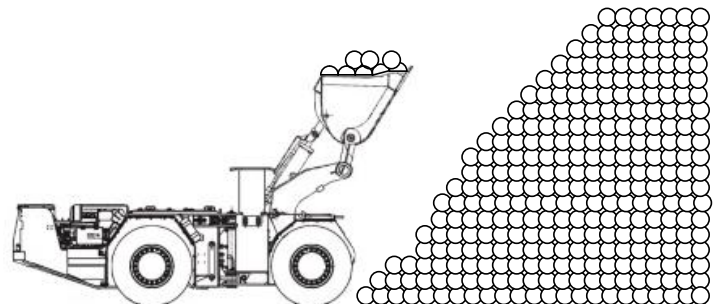


FIGURA 10: FASES DE LA EXCAVACIÓN.

5.4. Programación de software

La mayor parte del software programado fue hecho sobre ROS, lo que permite su uso tanto para el prototipo de laboratorio como en la máquina real. Sin embargo, las diferencias de hardware generan porciones específicas del código deban ser implementadas en forma particular para cada caso.

5.4.1. Software prototipo de laboratorio

El prototipo de laboratorio cuenta con una unidad de procesamiento a bordo de tipo Arduino, lo que hace necesario un programa para éste que comunique el bajo nivel (sensores y actuadores) con los algoritmos, estimadores y máquinas de estado implementados en ROS. Gracias a que ROS posee un paquete para generar la interfaz de comunicación con Arduino, “rosserial_arduino”, sólo resta utilizar la librería correspondiente para las funciones de transmisión y recepción de datos, lo que resulta transparente para el resto del programa. Respecto al mismo, sus principales funciones incluyen:

- Lectura de los sensores de presión en los cilindros de levante y volteo.
- Lectura de la corriente de los motores del móvil.
- Lectura de encoders de posición angular en las articulaciones central, de levante y de volteo.
- Lectura de encoders incrementales de motores eléctricos.
- Implementación de controladores de posición angular para las articulaciones de levante y volteo.
- Implementación de control diferencial electrónico para actuación de motores de ruedas delanteras (a través de puente H).
- Actuación de motor de ruedas traseras a través de placa controladora propietaria (diferencial mecánico).
- Actuación de válvulas solenoides a través de placa de transistores.
- Actuación de relé de encendido para bomba hidráulica.

5.4.2. Software máquina escala real

El LHD, modelo LF11H, de la empresa GHH Fahrzeuge, cuenta con una unidad PLC a bordo para el control de la máquina. Éste PLC se encuentra programado principalmente por el fabricante del equipo, a excepción de algunos módulos específicos para la automatización a cargo del equipo AMTC de la Universidad de Chile. El PLC implementa la adquisición y monitoreo de señales de interés, políticas de seguridad y control del circuito y motores hidráulicos de la máquina, entre muchas otras funciones, y se puede enlazar a través del protocolo CAN con un computador industrial con sistema operativo Linux, capaz de ejecutar código en ROS. Lo anterior requiere de la implementación de una interfaz de software para traducir mensajes del estándar CAN a ROS, lo cual fue un trabajo realizado por AMTC y que no se abordará en esta tesis. Es necesario mencionar, no obstante, que dentro de las señales que recopila el PLC de la máquina, existe una de comportamiento muy similar a la corriente de los motores eléctricos del prototipo. Ésta es la presión hidráulica de la transmisión del LHD, la cual varía en función de la potencia de los motores hidráulicos y puede ser utilizada en forma análoga a la corriente eléctrica mencionada.

5.4.3. Software común

El uso del entorno ROS habilita la programación de múltiples módulos de software comunes para el prototipo y el LHD real, permitiendo una efectiva abstracción del hardware. La extensión del código programado abarca la implementación de un número de funcionalidades como controladores, chequeos de seguridad, estimadores de estado, detectores de eventos, entre otros, los cuales en ocasiones difieren entre los del prototipo y la máquina real, principalmente por el hecho de que el LHD LF11H es un equipo comprometido para un proyecto de automatización más grande que sólo la carga autónoma, y en el cual trabaja un equipo de personas de AMTC. No obstante, el algoritmo central de la carga autónoma, que es el que se explica a continuación, es el mismo en ambos casos.

La primera implementación común relevante es la máquina de estados del proceso de “Carga de Mineral”, introducido en el Diagrama 4. Ésta se realizó en lenguaje Python y utilizando la librería “smach” de ROS, en conjunto con una forma particular de comunicación de procesos conocida como “acciones”. Una acción permite invocar, a través de ROS, una función de un proceso externo, la cual mientras se ejecuta debe enviar una retroalimentación o *feedback* y una vez finalizada debe enviar un resultado. Esto resulta especialmente útil cuando la ejecución de dicha función puede tomar mucho tiempo y sobre todo si se quiere detenerla en forma preventiva. “Autonomous_loading_m.py” implementa la máquina de estados de la tarea “Carga de Mineral”. Los estados definidos son:

- Esperar nueva acción.
- Posicionar la máquina.
- Posicionar el balde.
- Aproximarse a la pila.
- Excavar.
- Retirarse de la pila.
- Pesar la carga.
- Pedir asistencia (por caracterización, posicionamiento o carga).
- Analizar errores.

El estado de inactividad, en el cual comienza y al cual siempre regresa el programa es “Esperar nueva acción”, en él simplemente se espera que se realice una llamada a la acción de cargar autónomamente. Una vez recibida la orden de cargar, se invoca la llamada a un servicio para obtener la caracterización del punto de extracción, la cual es provista por un módulo caracterizador externo y debe estar finalizada para el momento en que se decide comenzar la carga de material. Si se obtienen condiciones adecuadas de la pila de rocas, se prosigue al siguiente estado, “Posicionar la máquina”, de lo contrario se pasa inmediatamente al estado de “Pedir asistencia por caracterización”, en el que el control es transferido a un teleoperador, quien decide si debe realizar alguna acción antes de devolver el control a la máquina autónoma, o sólo mantener el control hasta completar la tarea. El objetivo del estado “Posicionar la máquina” es que el LHD quede en la ubicación y disposición adecuada para únicamente bajar el balde, aproximarse en línea recta y comenzar a excavar la roca. Esta funcionalidad es llamada externamente a través de una acción, la cual puede retornar que se ha conseguido posicionar el equipo correctamente, o que no es posible, en cuyo caso se aborta la misión a través del estado “Analizar Errores”, si el motivo del fracaso fue una falla, o se llama al estado de “Pedir asistencia por posicionamiento”, en caso de que la acción de posicionamiento indique que se requiere asistencia humana. Para el caso favorable, el siguiente estado es “Posicionar el balde”, cuyo

único objetivo es bajar el mismo a ras de piso, por ejemplo, activando un controlador de posición y enviando la referencia adecuada. El siguiente estado de la secuencia es “Aproximarse a la pila”, en el que simplemente se envía un comando de movimiento a la máquina y se espera a la detección de la colisión del balde con la roca, funcionalidad provista por un nodo externo a cuyo resultado se suscribe la máquina de estados. Si ninguna detección es encontrada después de un tiempo determinado, se aborta la misión a través del estado “Analizar Errores”, en caso que sí se detecte el evento, comienza el estado de “Excavar”, el cual llama al algoritmo de excavación a través de una acción.

La implementación del algoritmo de excavación se revisa más adelante y tiene dos posibles resultados: éxito o fracaso. El éxito se obtiene si la rutina termina normalmente, independiente del factor de carga del balde obtenido, mientras que el fracaso ocurre si se presenta algún error durante la ejecución del programa. El siguiente estado en la línea es “Retirarse de la pila” en el que simplemente el LHD debe retroceder unos metros, para luego comenzar con “Pesar la carga”, estado que llama a la acción de pesaje, cuyo resultado finalmente indicará cuánta carga logró la excavación y, dependiendo si el valor se encuentra sobre o bajo un umbral, se considerará la misión exitosa, retornando a “Esperar nueva acción” o incompleta, en cuyo caso se pasa a “Pedir asistencia por carga”, en que se solicita al teleoperador llenar el balde, el cual luego será pesado nuevamente.

El estado “Analizar Errores” es el que se define como resultado de cualquier error, condición anormal o indeseada que se pueda suscitar durante la ejecución de la máquina de estados de la carga de mineral. En él, se completan los mensajes para enviar el resultado de misión fallida de la acción de carga. Se limpian las variables necesarias y reinicia el sistema para devolverse al estado de “Esperar nueva acción”.

Los estados de asistencia, separados en asistencia por caracterización, posicionamiento y carga, se definen de esta manera para asegurar las transiciones correctas en forma clara dentro de la máquina de estados. En todas ellas la acción que se llama es la misma, que es la acción de asistencia, la cual transfiere el control del LHD al teleoperador y luego espera a que retorne si se debe continuar autónomamente o abortar la misión en curso. En caso de que la asistencia tome un tiempo mayor que un umbral definido, entonces la misión se abortará automáticamente por motivos de seguridad. Específicamente, si la respuesta de la asistencia es continuar autónomamente, entonces si el motivo es caracterización, se continúa con el estado “Posicionar la máquina”, si el motivo es el posicionamiento de la máquina, entonces se continúa con “Posicionar el balde” y, si el motivo es poca carga con excavación autónoma, entonces se prosigue con “Pesar la carga”, luego de que el operador hubiese llenado el balde mediante teleoperación.

De todos los estados mencionados anteriormente, los únicos que se implementan con funcionalidad completa son “Esperar nueva acción”, “Aproximarse a la pila” (y su correspondiente detector de colisión con la roca) y “Excavar”, esto por motivos de seguridad y tiempo disponible de la máquina LHD real. Las demás funcionalidades, como posicionar la máquina, bajar el balde, pesar el balde, etc., se implementan preliminarmente como servicios de respuesta positiva automática, por lo que antes de comenzar a probar la “Carga Autónoma” se debe tener al LHD con el balde a piso, frente a la roca apilada. Cabe resaltar que, para el prototipo de laboratorio, sí se contó con controladores para posicionar el balde a ras de piso y también con un módulo para pesar la carga del balde, por lo que se pudieron obtener resultados

más completos acerca del factor de llenado del balde y probar en mayor extensión la funcionalidad de la máquina de estados propuesta para la carga autónoma.

El segundo módulo de primordial importancia implementado es el del algoritmo de excavación. En general, el algoritmo implementado sigue los lineamientos del Diagrama 6 de la Sección 5.1. En cada ciclo se comprueban las condiciones de término, las cuales incluyen que se alcancen el volteo o levante completo del balde, o la máquina se desplace una distancia superior a un umbral desde el comienzo de la excavación. Luego se prosigue con la secuencia de excavación propiamente, donde se alterna entre dos posibles estados: “retraer el balde” o “empujar” (y posiblemente levantar), en ambos casos manteniendo la señal de pedal de aceleración al máximo. La primera acción de control que ejecuta el programa es la retracción del balde durante un intervalo temporal definido, es decir, la duración de la activación de este estado debe ser mayor que un tiempo mínimo, pero menor que un tiempo máximo. La otra condición por la que el primer estado puede darse por finalizado es que se alcance un ángulo de volteo predeterminado, aunque ésta sólo se utiliza la primera vez en este estado, con el objetivo de controlar que el algoritmo no termine con sólo un movimiento del balde. En seguida se pasa al estado de empujar, en el cual no se activa la retracción del balde, pero sí puede activarse el levante, en caso de detectarse derrape de las ruedas de la máquina (variable provista desde un módulo externo del sistema). Este segundo estado continúa durante un tiempo definido, también con una cota mínima y máxima, o hasta que se alcance un umbral del ángulo de levante previamente establecido (sólo la primera vez en este estado, por la misma razón descrita anteriormente). En el caso del LHD real, el segundo estado también puede terminar por una presión hidrostática sobre un umbral. El algoritmo diseñado alterna entre ambos estados descritos hasta que se detecte una condición de término o la máquina de estados de la “Carga Autónoma” del nivel superior, fuerce la detención por exceder el límite de tiempo asignado. Este límite de tiempo o “*timeout*” se implementa en el nivel superior del programa por motivos de seguridad, como por ejemplo en caso de que la rutina de excavación no pueda finalizarse nunca debido a que el LHD se haya atascado.

El esquema descrito genera un método de excavación en que los grados de libertad de la pala del LHD (levante y volteo) se activan de forma independiente y en una secuencia que genera un tren de pulsos para el movimiento del volteo y durante el cual el levante podría activarse sólo de ser necesario en los intervalos de tiempo en que el volteo no está activo. Este desacople de los grados de libertad resulta beneficioso en términos de la potencia que puede entregar la máquina, en el sentido de que en ningún momento esta potencia requiere dividirse en la ejecución de dos movimientos simultáneos. Si bien resulta razonable que esta característica podría ayudar a una mejor realización de la excavación, su análisis técnico queda fuera de los alcances de esta tesis.

Las interacciones anteriores se ilustran en el Diagrama 7, donde α corresponde a un ángulo de volteo, β a un ángulo de levante, Δt a un intervalo de tiempo y PT a la presión de la transmisión hidráulica. Como ya se ha mencionado, la técnica de utilizar el levante, o bien levantar el *boom*, cuando se detecta derrape, surge, como gran parte del algoritmo, de las entrevistas a operadores e instructores acerca de las maniobras de carga, pero también responde a una variable de interés económico, que es evitar el desgaste de los neumáticos.

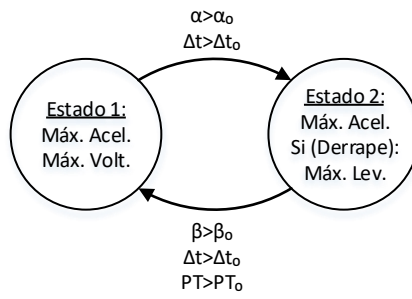


DIAGRAMA 7: INTERACCIÓN ENTRE ESTADOS DEL ALGORITMO DE EXCAVACIÓN.

Capítulo 6: Pruebas, resultados y análisis

6.1. Definición de métricas

Desde el punto de vista minero, el desempeño de la operación con máquinas LHD se mide con el tonelaje por hora que se logra extraer. Es decir, existe una combinación de dos variables relevantes: masa recogida por el balde y el tiempo de ciclo. Sin embargo, el tiempo de ciclo considera la suma de los tiempos de carga, desplazamiento y descarga. En particular el de desplazamiento depende mucho de la disposición de túneles y puntos de descarga o acopio de la mina, lo cual resulta poco conveniente para realizar comparaciones, por lo que en este caso se prefiere utilizar sólo el tiempo de la maniobra de carga y la cantidad de material cargado como métricas de comparación. Globalmente, una de ellas podría ser más importante que la otra, lo cual dependerá en cada caso particular de los otros tiempos involucrados para completar el ciclo.

En el caso del prototipo de laboratorio es posible estimar ambas variables: el tiempo a partir del análisis de los datos de carga (como los graficados en la Figura 6 de la Sección 5.2), contando desde el instante en que choca contra la pila de rocas (*peak* de la corriente de los motores), hasta que inicia la retirada (variable de “pedal” negativa); mientras que la masa cargada en el balde es estimada con un método programado que utiliza la presión del cilindro de levante en una posición fija de las articulaciones de la pala y el cual debe ser previamente calibrado utilizando un conjunto de cargas de masa conocida.

En el caso del LHD real, la evaluación de ambas métricas resulta más complejo. En primer lugar, no se cuenta con un módulo de software para realizar el cálculo de la masa cargada en el balde y, en segundo lugar, el proceso de carga manual¹ usualmente es completado efectuando más de una maniobra de carga, es decir, el operador lo intenta varias veces, típicamente entre dos y tres.

Para superar la carencia de una estimación de la masa cargada, se opta por la alternativa de evaluar visualmente el factor de llenado del balde, tal como lo haría un operador desde la cabina del vehículo, utilizando las imágenes de cámaras montadas sobre el equipo. Esta evaluación cualitativa la realiza el autor de esta Tesis en base a los datos capturados durante los experimentos, asignando uno de tres posibles niveles “bueno”, “regular” y “pobre”. Estas apreciaciones se hacen de acuerdo con el criterio obtenido de los operadores de la CMSG, junto a los cuales se realizaron las pruebas. Por otra parte, para obtener una medida más representativa y comparable del tiempo de la carga, se decide realizar la estimación utilizando cada maniobra o intento de carga en forma separada. Esta metodología adolece de la incapacidad de obtener una relación uno a uno entre tiempo de carga y cantidad de material cargado. Sin embargo, se configura en un escenario más realista que considerar la totalidad del tiempo invertido en la carga, el cual incluye una porción considerable en tiempos de desplazamiento. Asimismo, se opta por realizar las comparaciones utilizando el promedio simple de los tiempos medidos. Esto último, debido a que, en cada maniobra de cada prueba realizada, la estrategia de carga del operador, una vez inserto el balde en la roca, no varía demasiado, por lo que el tiempo que le toma completarla también resulta en valores similares.

Por otro lado, desde el punto de vista económico, la variable temporal se considera en formato acumulado (por hora/turno/día), restando importancia a su variabilidad unitaria.

¹ En rigor la carga de material en la mina subterránea de la CMSG se realiza con operación a control remoto utilizando línea de vista.

Existe un factor adicional a considerar en el caso particular de la operación con LHD en la CMSG. Éste es que, durante la operación manual, el operador debe bajarse de la máquina para cargar con el equipo, utilizando un control remoto en línea de vista. Esto añade un tiempo extra que no existe en el caso de las cargas realizadas en forma autónoma, como se discute más adelante.

6.2. Pruebas prototipo de laboratorio

El software programado fue probado en el prototipo a escala de laboratorio presentado en la Sección 3. En todos los experimentos se utilizó una configuración inicial similar del equipo (posición del balde y distancia a la pila de rocas). Además, para estas pruebas, se contó con un módulo de software capaz de pesar la carga del balde, lo cual, sumado a la completa disponibilidad del equipo, permitió la evaluación intensiva del desempeño del método propuesto. Es relevante destacar la importancia de contar con un prototipo de LHD a escala para la realización de pruebas preliminares. Si bien las condiciones a las que se somete un prototipo podrían diferir enormemente de las de una operación real en una mina, esta sigue siendo una aproximación mucho más realista que el uso de, por ejemplo, un simulador, ya que al menos en el caso de los simuladores que se encuentran disponibles de forma gratuita, no existe una modelación de las fuerzas inter-granulares de conjuntos tan elevados de partículas.

Las primeras pruebas realizadas con el prototipo tuvieron como objetivo analizar la importancia del factor de derrape en las ruedas en el factor de llenado del balde, a modo de comprobar la información recabada de las distintas entrevistas con operadores y conocimiento general obtenido acerca de la operación. Estos experimentos se realizaron en una etapa temprana del desarrollo del sistema de carga autónoma implementado, por lo que los detalles específicos y valor de los parámetros utilizados no se encontraban completamente calibrados. Además, la granulometría de la pila de rocas fue principalmente homogénea y con piedras de pequeño tamaño, como las mostradas en la Figura 3 de la Sección 3.1.1. Si bien podría juzgarse que estas condiciones son poco representativas de las condiciones en una mina subterránea real, en realidad, dado que lo que se busca estudiar es cómo afecta el derrape de las ruedas del LHD al desempeño de la operación de carga, basta con poder comparar ejemplos con mucho y poco derrape, por lo que los factores ambientales o incluso calibración de los parámetros no son particularmente relevantes y basta con que sean constantes en la duración de los experimentos.

La Figura 11 muestra un gráfico con 35 experimentos de carga autónoma, en el que cada intento es representado por dos círculos concéntricos, uno azul para representar el derrape del tren delantero y uno rojo para el derrape del tren trasero. El diámetro del círculo dibujado corresponde al nivel de derrape del respectivo par de ruedas. Se puede constatar que las cargas con peor desempeño (menor masa de material extraído) efectivamente corresponden con un factor de derrape mayor para el tren delantero. También se puede atisbar, aunque menos notoriamente, que los mejores ejemplos de carga (menor tiempo con mayor masa extraída) corresponden con un factor de derrape bajo para todas las ruedas del LHD a escala, lo cual confirma la importancia de mantener la tracción del vehículo durante el proceso. Cabe mencionar que el derrape conjunto de ambas no es detectable con el método utilizado en el prototipo de laboratorio, el cual consiste en comparar el giro de las ruedas delanteras con las traseras, por lo que un caso sin derrape alguno, sería equivalente a uno con el mismo nivel de derrape en todas las ruedas. En general, sin embargo, el resbalamiento no es excesivo cuando se da en ambos trenes del vehículo, siendo los casos críticos cuando uno derrapa más que el otro y, particularmente, cuando el delantero derrapa demasiado.

A modo de comparación se presenta, en la Figura 12, el mismo gráfico para cargas realizadas por un operador humano en forma teleoperada con línea de vista, donde se puede observar que, en efecto, el operador se preocupa de mantener la tracción del tren delantero. Una mejor comparación de los modos de operación se ve en la Figura 13, donde se evidencia una mejor consistencia en la cantidad de material extraído por el operador humano en relación al sistema autónomo.

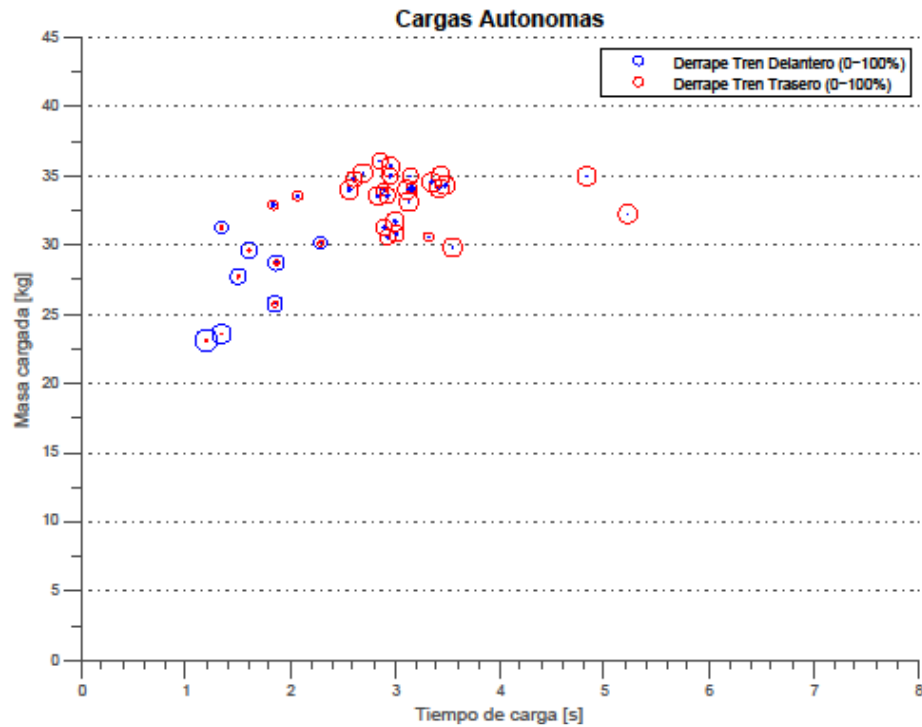


FIGURA 11: CARGAS AUTÓNOMAS CON MATERIAL GRANULAR HOMOGÉNEO. TAMAÑO DE LOS CÍRCULOS REPRESENTAN NIVEL DE DERRAPE DE LOS TRENES DELANTERO (AZUL) Y TRASERO (ROJO).

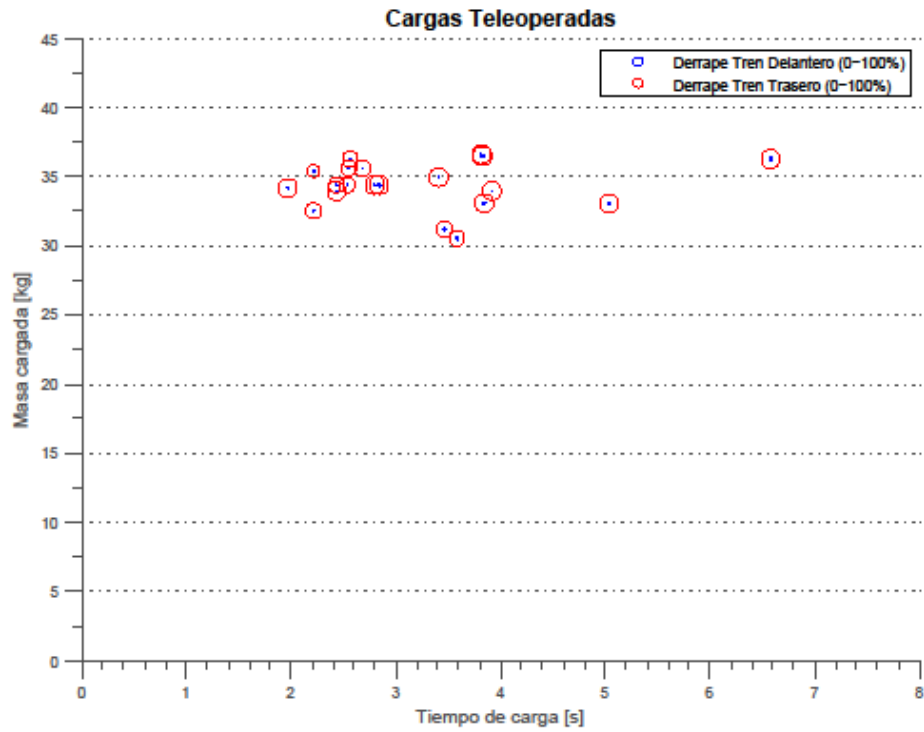


FIGURA 12: CARGAS TELEOPERADAS CON MATERIAL GRANULAR HOMOGÉNEO. TAMAÑO DE LOS CÍRCULOS REPRESENTAN NIVEL DE DERRAPE DE LOS TRENES DELANTERO (AZUL) Y TRASERO (ROJO).

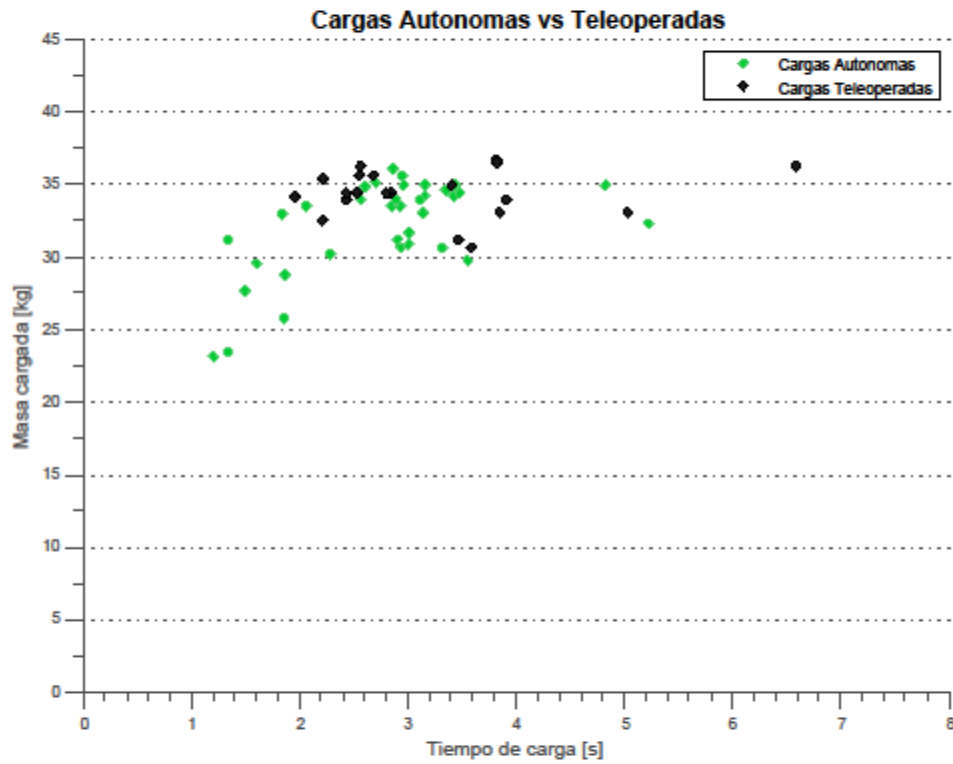


FIGURA 13: DESEMPEÑO COMPARATIVO ENTRE CARGAS AUTÓNOMAS Y TELEOPERADAS PARA MATERIAL GRANULAR HOMOGÉNEO.

Para el siguiente conjunto de pruebas del algoritmo, los parámetros se encontraban completamente calibrados y además la granulometría del punto de extracción fue heterogénea, como se pudo ver en la Figura 3 de la Sección 3.1.1. En este caso también la teleoperación se realizó en forma remota mediante una cámara montada sobre el equipo.

La Figura 14 muestra imágenes de una cámara montada sobre el prototipo de laboratorio, obtenidas antes (a) y después (b) de la operación de carga autónoma, así como también tras una operación de carga teleoperada por un usuario experimentado (c) y tras una teleoperación por un usuario inexperto (d).

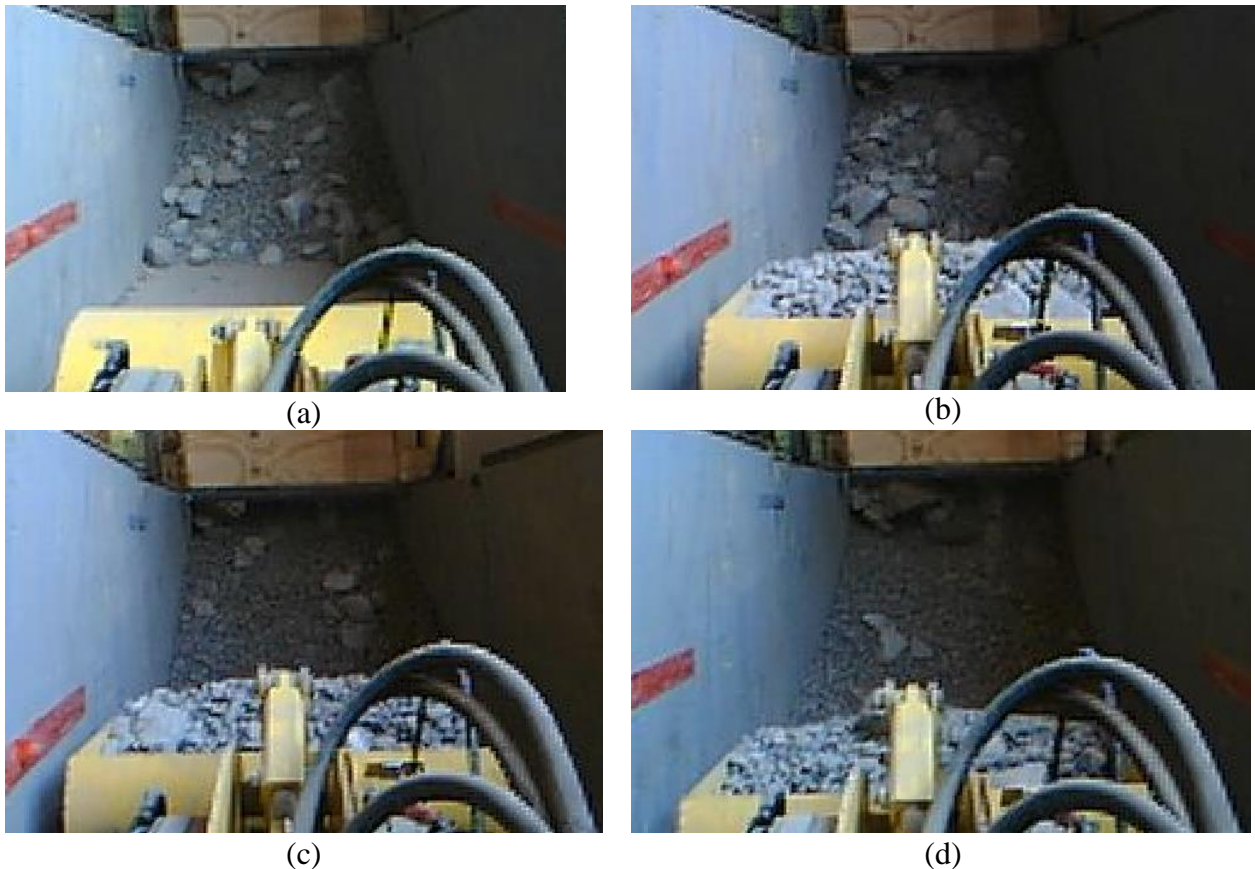


FIGURA 14: IMÁGENES OBTENIDAS DESDE LA CÁMARA DEL PROTOTIPO DE LABORATORIO. (A) PREVIO A LA EXCAVACIÓN, (B) RESULTADO DE UNA CARGA AUTÓNOMA, (C) RESULTADO DE UNA CARGA TELEOPERADA POR EXPERTO, (D) RESULTADO DE CARGA TELEOPERADA POR NOVATO.

Las tres modalidades de operación de carga mencionadas (autónoma, teleoperación por experto y teleoperación por novato) se probaron un total de 15 veces cada una, a modo de poder establecer comparaciones. El gráfico del resultado de estos experimentos se muestra en la Figura 15 y se puede ver como el algoritmo autónomo tiene un desempeño comparable al de un teleoperador experto y supera significativamente el desempeño de un operador inexperto. La Tabla 2 muestra los promedios de tiempo y masa de rocas extraída en cada modalidad.

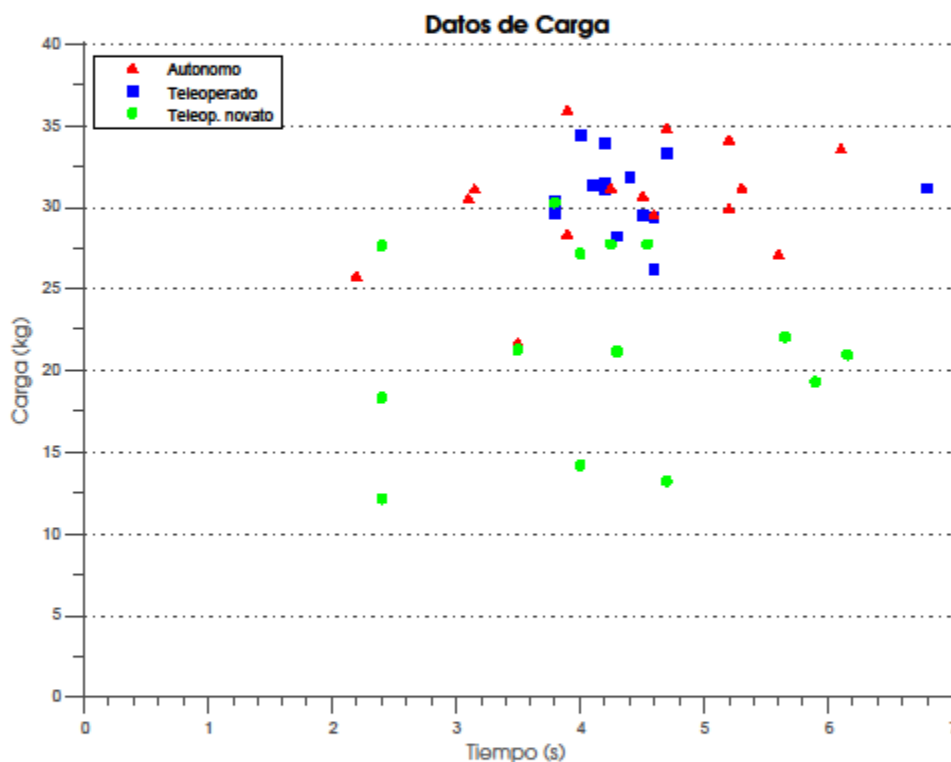


FIGURA 15: DESEMPEÑO COMPARATIVO ENTRE CARGAS AUTÓNOMAS, TELEOPERADAS POR EXPERTO Y TELEOPERADAS POR NOVATO PARA MATERIAL GRANULAR HETEROGÉNEO.

TABLA 2: PROMEDIOS DE DURACIÓN TEMPORAL DE OPERACIONES DE CARGA Y MASA EXTRAÍDA EN LOS DISTINTOS MODOS DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO DE LABORATORIO PARA GRANULOMETRÍA HETEROGÉNEA.

	Autónomo	Teleoperado	Teleop. novato
Tiempo medio [s]	4.35	4.43	4.36
Carga media [kg]	30.3	30.8	21.7

Cabe notar también, al comparar la Figura 13 con la Figura 15, que existe un evidente aumento en la dificultad de la operación de carga cuando se pasa de una granulometría homogénea y pequeña a una heterogénea, que se traduce directamente a un aumento del tiempo que demora la operación de carga y disminución simultánea de la masa de material recogido.

Una vez calibrados los parámetros del algoritmo se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de los más importantes, que para el prototipo de laboratorio corresponde fundamentalmente a los tiempos mínimo y máximo de cada estado. Para esto, se efectuaron ligeras variaciones en torno a su valor inicial, sin embargo, no se obtuvieron resultados significativamente diferentes. Se pudo notar durante las pruebas, que los factores que más influyeron en el factor de llenado del balde fueron el correcto posicionamiento inicial del balde a ras de piso y que no existieran rocas muy grandes a una altura media del punto de excavación.

En el primer caso, el correcto posicionamiento del balde a ras de piso permite una penetración inicial en la pila de rocas que favorece una tracción adecuada. Por el contrario, si el balde no tiene un buen contacto contra el suelo, el choque genera que el tren delantero del vehículo se levante, con lo cual las ruedas derrapan y el algoritmo levanta el balde para mejorar la tracción. Lo anterior significa que la excavación comienza con una posición mucho más elevada del balde, con lo cual efectivamente recoge menos material con el mismo desplazamiento dentro de la pila.

En el segundo caso, cuando se tienen rocas grandes a media altura en el punto de extracción, el fenómeno que ocurre es que, al chocar contra ellas, el balde, que lleva cargado cerca de la mitad del material, posee una orientación desfavorable que no le permite cargarlas, al mismo tiempo que dificulta una mayor penetración de la pala y finalmente no es capaz de extraer más material. Distinto es el caso cuando la misma roca se encuentra al frente de la pila, ya que en esta situación no existen dificultades para que ésta entre en el balde del LHD prototipo en el momento de la colisión.

6.3. Pruebas LHD real

Las pruebas en la máquina LHD LF11H estuvieron principalmente condicionadas a la disponibilidad del equipo, por lo que el número de experimentos es notoriamente inferior a los realizados con el prototipo de laboratorio. Adicionalmente, y como ya se indicó en la Sección 6.1, en la máquina a escala real no se contaba con un sistema de pesaje para la carga del balde, por lo que la evaluación acerca del desempeño de una ejecución de carga autónoma es medida sólo en forma cualitativa, basado en las imágenes obtenidas desde las cámaras montadas sobre el equipo. Dicho esto, también es importante notar que, debido a la naturaleza del ambiente, el cual corresponde a una mina real y operativa, las condiciones y geometría del terreno implican una dificultad adicional para la operación, lo cual afecta principalmente al posicionamiento inicial del LHD, como se evidencia más adelante.

Los experimentos realizados siguieron el procedimiento detallado a continuación:

1. El operador humano (personal de la CMSG), desde la sala de control ubicada en el barrio cívico y en forma teleoperada, posiciona el LHD y la articulación de su pala de forma tal, que la única acción necesaria para colisionar con la roca a extraer sea avanzar en línea recta.
2. El operador luego presiona un botón, el cual inicia el módulo de software encargado de la carga autónoma y que consiste en una fase de aproximación (movimiento en línea recta a máxima potencia o con pedal a fondo), detección de la colisión con la pila de rocas y ejecución de la rutina de excavación, todas ellas llevadas a cabo sin intervención del operador.
3. Una vez finalizada la excavación, el operador retoma el control de la máquina para retirarla y descargar el material recogido.

Dichos experimentos se llevaron a cabo en dos lugares de la mina: un punto de acopio de mineral o “*stockpile*” y un punto de extracción de mineral regular o “caserón”. El detalle de las pruebas se comenta a continuación.

6.3.1. Cargas autónomas en *stockpile*

El punto de acopio de mineral en el que se realizaron los primeros intentos de carga autónoma poseía características geométricas del terreno que requerían de un posicionamiento particular y preciso del balde previo a la aproximación a la pila de rocas. Esto porque en el suelo existía una depresión entre el lugar desde donde partía la máquina LHD y el lugar donde estaban depositadas las rocas, por lo que, si se intentaba una aproximación con el balde a ras de piso o muy abajo, al inclinarse el vehículo durante el trayecto, el balde del mismo se apoyaba contra el suelo, levantando las ruedas delanteras y evitando que pudiese seguir avanzando.

Para esta ubicación se realizaron 13 intentos de carga autónoma, de los cuales 6 fueron buenos (balde completamente lleno), 2 tuvieron un desempeño regular (balde medianamente lleno) y 5 obtuvieron un desempeño pobre (muy poca carga en el balde). Todos los intentos con desempeño pobre se debieron a que el operador no posicionó correctamente el balde para tomar en cuenta la geometría del terreno, por lo que la máquina, o bien se atascó durante la aproximación, o chocó contra la pila con el balde muy levantado y no pudo penetrar. Para los demás experimentos el posicionamiento fue correcto y la rutina de excavación finalizó su ejecución según lo programado, logrando obtener un factor de llenado suficiente del balde en la mayoría de los casos (6 buenos, 2 regulares). La Figura 16 muestra el gráfico de las variables relevantes para una ejecución de la maniobra de carga autónoma. En la Figura 17 se puede observar una imagen de la cámara del LHD con el balde cargado resultante para un experimento con resultado “bueno”.

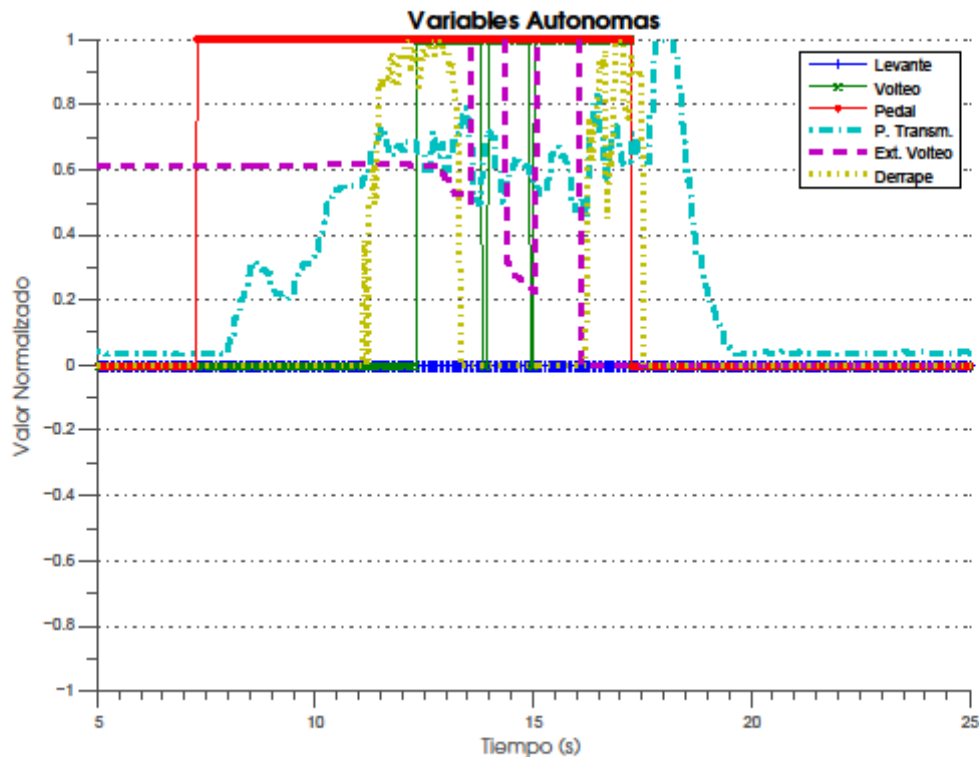


FIGURA 16: VARIABLES RELEVANTES DURANTE UNA CARGA AUTÓNOMA EN PUNTO DE ACOPIO.



FIGURA 17: BALDE CARGADO RESULTANTE DE UNA CARGA AUTÓNOMA EN PUNTO DE ACOPIO.

A modo de comparación se presenta en la Figura 18 el gráfico de las variables para una carga realizada por un operador en forma manual. Asimismo, la Figura 19, muestra la imagen del balde cargado obtenido.

Resulta claro de un simple análisis visual de los gráficos de las variables para la carga autónoma y aquella realizada por un operador, que el control de los actuadores difiere en cuanto a la frecuencia y duración de los comandos de retracción del balde, así como también de la cantidad de “pedal” o potencia del motor utilizada, esta situación es una característica que fue recurrente en los distintos experimentos de carga. No obstante, el trasfondo de la técnica para cargar es la misma: acelerar contra la pila de rocas y voltear el balde hasta que se llene. Más aún, en ambos casos se logra llenar el balde. A partir de las imágenes mostradas se podría pensar que la carga autónoma consigue un mejor desempeño, pero estas imágenes sólo corresponden a dos casos particulares, en el cual el factor de llenado del caso autónomo fue muy bueno. Además, es importante hacer notar que típicamente un operador humano realiza más de una aproximación de carga para llenar el balde, lo cual hace que compararlas no sea directo. En el ejemplo mostrado, sin embargo, el operador decidió que el balde estaba lo suficientemente lleno y finalizó el proceso de carga con un intento. Por este motivo se escogió este ejemplo para realizar la comparación.

En cuanto a la comparación del desempeño temporal entre la carga autónoma y con operario, el contraste fue realizado considerando cada maniobra de carga (cada intento o reintento individualmente), tal como se mencionó anteriormente. En este sentido se midió el tiempo promedio por cada intento de carga realizado por el operador humano, desde el momento en que choca contra la pila de rocas, hasta que comienza a retroceder con el LHD. Los resultados se presentan en la Tabla 3, siendo el sistema autónomo, en promedio, más rápido que el operador contra el que se evaluó. Además, el operador humano usualmente requiere de dos intentos de

carga para llenar lo suficiente el balde, por lo que, si se considera el tiempo total de la fase de carga de material, el sistema autónomo supera notablemente al operador humano.

Estos resultados ciertamente difieren respecto de los obtenidos para el prototipo de laboratorio, principalmente por la costumbre que tienen los operadores de la CMSG de cargar en múltiples intentos, lo cual los lleva a poner menor cuidado en el posicionamiento inicial del balde del que se tuvo para los casos autónomos exitosos. Esto demuestra una vez más, y al igual que para los experimentos de laboratorio, la importancia del posicionamiento inicial del balde.

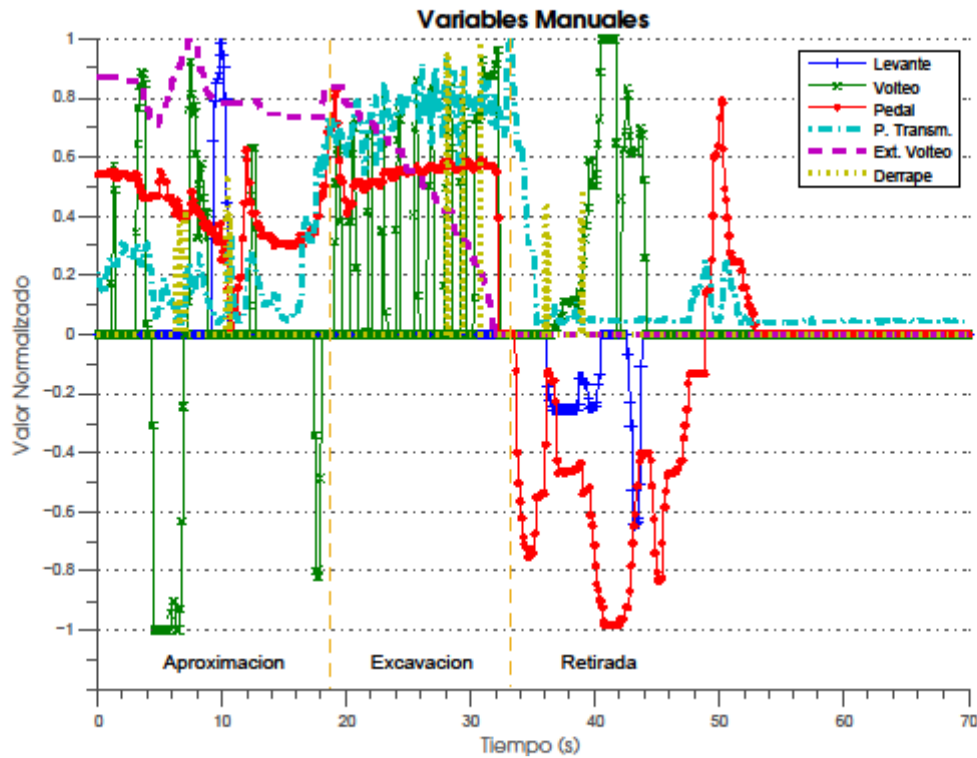


FIGURA 18: VARIABLES RELEVANTES DURANTE UNA CARGA MANUAL EN PUNTO DE ACOPIO.



FIGURA 19: BALDE CARGADO RESULTANTE DE UNA CARGA MANUAL EN PUNTO DE ACOPIO.

TABLA 3: TIEMPO PROMEDIO DE CARGA EN PUNTO DE ACOPIO.

	Autónomo	Manual
Tiempo medio por intento de carga	6.4	12.2

6.3.2. Cargas autónomas en caserón

El punto de extracción de mineral en el que se pudieron realizar pruebas se encontraba al final de un túnel de gran extensión. Esto introducía el requerimiento de ser capaz de llegar a este lugar con la máquina en forma completamente teleoperada, por lo que se requirió más tiempo hasta poder ejecutar los experimentos.

Las características del suelo en el caserón eran mejores que las del *stockpile*, sin embargo, existía la dificultad adicional de irregularidad en la forma de las paredes del túnel justo en el lugar donde estaba el mineral a cargar, por lo que el posicionamiento y orientación de la máquina previo al inicio de la secuencia autónoma también debía ser hecho con precisión.

Para esta ubicación se realizaron 4 intentos de carga autónoma, de los cuales 3 fueron fallidos y sólo 1 se completó en forma exitosa. Para los primeros dos, el operador no orientó correctamente el LHD, produciendo que, durante la aproximación, el balde chocara contra la pared del túnel en vez de con la pila de rocas. Para el tercer intento el posicionamiento manual del equipo lo dejó muy lejos de la roca, por lo que la aproximación tomó más tiempo del permitido y la rutina terminó por “*timeout*”. Finalmente, la cuarta ejecución de la rutina de carga autónoma obtuvo un buen posicionamiento inicial, que le permitió impactar directamente contra la pila de rocas y completar correctamente la secuencia de excavación, obteniendo un factor de llenado del balde que califica como “bueno”, según el criterio de los operadores de la CMSG.

Además, es importante notar que para esta prueba se modificó levemente el algoritmo de excavación autónoma, en el sentido de que se introdujo un aumento de los comandos de la pala con forma de rampa, en vez de simples pulsos, aprovechando así el control de apertura proporcional de las válvulas de los cilindros de la máquina LHD, al mismo tiempo que se suaviza el movimiento. También se aumentó el tiempo mínimo para el estado de empuje y levante en caso de derrape del algoritmo de excavación (“Estado 2” del Diagrama 7 en la Sección 5.4.3), permitiendo así más tiempo de sólo empuje o para levantar el balde, de ser necesario, a la vez que se espacian más los comandos de volteo. El motivo principal de estas modificaciones fue la intención de evaluar cómo afectaba una rutina de ejecución más lenta (intensidad y frecuencia de la acción de volteo disminuida) a la cantidad de material cargado, sin embargo, esto no se logró, pues sólo se pudo realizar un experimento por falta de disponibilidad de la máquina LHD.

La Figura 20 muestra un gráfico de las variables relevantes de la operación autónoma exitosa y la Figura 21 una imagen del balde cargado obtenido desde la cámara del equipo.

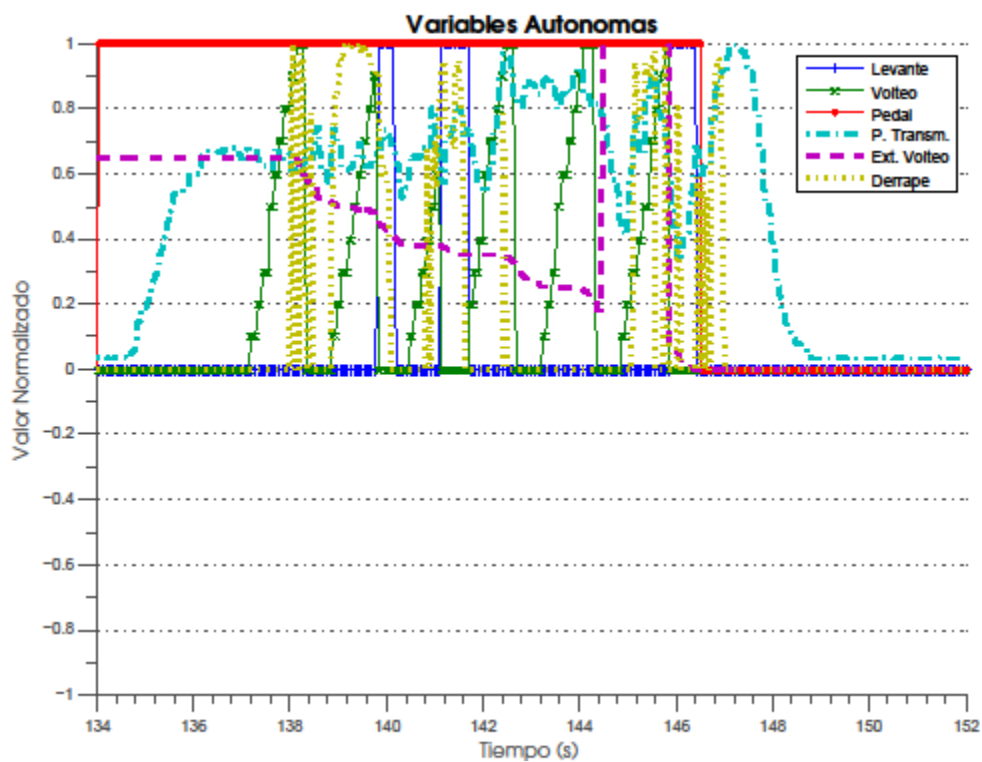


FIGURA 20: VARIABLES RELEVANTES DURANTE LA CARGA AUTÓNOMA EN CASERÓN.



FIGURA 21: BALDE CARGADO RESULTANTE DE LA CARGA AUTÓNOMA EN CASERÓN.

A modo de comparación se presenta en la Figura 22 el gráfico de las variables para una carga realizada por un operador con control remoto y línea de vista. Asimismo, la Figura 23, muestra la imagen del balde cargado obtenido.

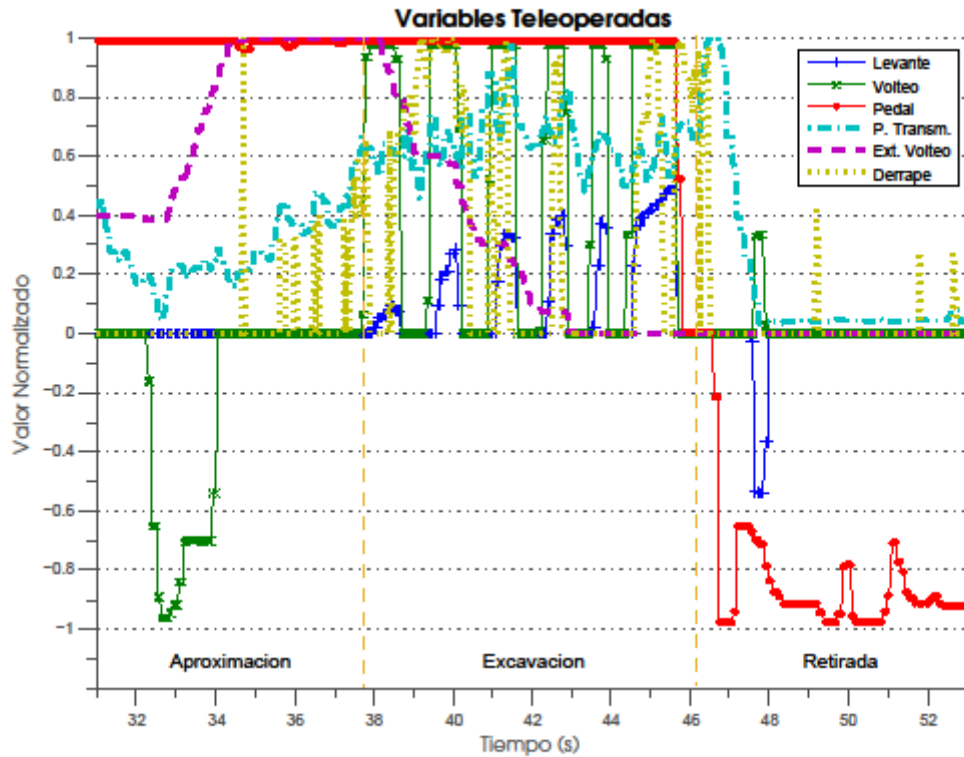


FIGURA 22: VARIABLES RELEVANTES DURANTE UNA CARGA TELEOPERADA CON LÍNEA DE VISTA EN CASERÓN.



FIGURA 23: BALDE CARGADO RESULTANTE DE UNA CARGA TELEOPERADA CON LÍNEA DE VISTA EN CASERÓN.

Se puede ver de los gráficos anteriores que, en el caso de la carga en el caserón, el comportamiento de las variables entre el operador y el sistema autónomo es más parecido que lo obtenido anteriormente en el *stockpile*.

Debido a que sólo se logró realizar una carga autónoma exitosa, no se disponen datos para hacer algún tipo de comparación con la operación humana, salvo mencionar que, de los tiempos de carga por cada intento, medidos para un operador en particular, se obtuvo un promedio de 7.5 segundos, con desviación estándar de 1.4 segundos, mientras que el intento autónomo exitoso tardó 9.3 segundos en completarse. Lo anterior, sin embargo, no permite sacar conclusiones más allá de que dicho tiempo de carga se encuentra dentro del rango normal de operación y que, debido a las modificaciones introducidas al algoritmo, es también mayor que para los experimentos de carga en *stockpile*.

A pesar de la cantidad limitada de pruebas y datos disponibles de los experimentos en la faena minera de *sublevel stoping*, es posible anticipar un potencial beneficio al utilizar un sistema de carga autónoma y el cual está relacionado con el desempeño temporal del algoritmo autónomo. En una operación normal, con humanos, luego de conducir el LHD hasta el caserón, el operador debe bajarse de la máquina, cargar el balde mediante el uso de su control remoto, que usualmente le toma entre 2 y 3 intentos de carga y, finalmente, volver a subirse a la máquina para conducirla de vuelta al punto de acopio de material. Todo este proceso le toma aproximadamente entre 90 y 120 segundos en caso que no existan dificultades adicionales (20 segundos para bajar y subir a la máquina, 25 segundos por intento de carga, considerando desplazamientos). Mientras que para un sistema autónomo, se estima que sólo se requeriría alrededor de 40 segundos si se logra llenar lo suficiente el balde en un intento (10 segundos para posicionarse previo a la maniobra y 30 segundos para la etapa completa de carga). Por supuesto, lo anterior requeriría un sistema de posicionamiento automatizado que fuera rápido y preciso, componente factible de desarrollar, pero del cual no se dispuso durante los experimentos.

Capítulo 7: Conclusiones

Respecto del trabajo de investigación realizado, su desarrollo, experimentos y los resultados obtenidos, se pueden concluir los siguientes puntos:

- A través del estudio de la literatura disponible y la información adquirida directamente de operadores de máquinas LHD, se lograron identificar cuatro etapas bien definidas para la carga de roca fragmentada: evaluación visual, aproximación, excavación y retirada. Además, se pudo comprender a cabalidad las distintas tareas que realizan estos equipos en ambientes de minería subterránea.
- Gracias a lo anterior, se pudo especificar un modelo de operación integrado para máquinas LHD, desde el más alto nivel, esbozado sólo a nivel conceptual y encargado de la administración de los recursos, luego en forma más específica, definiendo máquinas de estado para llevar a cabo la tarea de extracción de mineral, e implementando en ROS la lógica completa del flujo de información durante la maniobra de carga, para lo cual se habilitaron interfaces apropiadas para los módulos de software necesarios y de implementación pendiente, pero que quedan fuera del alcance de esta Tesis, así como también con la operación teleoperada del equipo.
- Finalmente, y en la misma línea anterior, se programó completamente un algoritmo de excavación basado en las técnicas que utilizan los operadores humanos para cargar roca, el cual se pudo acoplar de manera sencilla con la máquina de estados de la maniobra completa descrita anteriormente, permitiendo así la ejecución de pruebas tanto en un prototipo de laboratorio, como en una máquina LHD de escala real y durante las cuales interactuaron satisfactoriamente, y de forma integrada, la teleoperación del equipo, con las etapas de aproximación y excavación de la carga autónoma.
- En base a las métricas propuestas de cantidad de material cargado y duración de la etapa de excavación, se evaluó el desempeño del método implementado, demostrando un rendimiento similar al de un operador humano experimentado, para el prototipo de laboratorio. Para la validación con el LHD real, el método autónomo en *stockpile* logró resultados de llenado apropiado del balde en menor tiempo que el operador contra el que se comparó, admitiendo sí, que el posicionamiento inicial del balde para el caso autónomo se realizó con mayor cuidado en estos casos que el que tiene el operador cuando ejecuta la carga en forma manual. Aun así, debido a la práctica de cargar material a través de varios intentos de excavación por parte de los operadores en la faena minera analizada, el sistema autónomo podría efectivamente llegar a un rendimiento global superior al humano.
- Adicionalmente se pudo identificar que el algoritmo de control del balde durante la excavación de mineral sólo contribuye en una parte al éxito del objetivo de la maniobra de carga. En general, resulta tanto o incluso más relevante una correcta orientación de la máquina y posicionamiento previo del balde, para asegurar que el LHD no se atasque en el terreno o choque contra alguna pared en vez de contra la pila de rocas. Cuando se solicita a un humano la ejecución estas tareas, como fue en el caso de los experimentos realizados, el éxito de los mismos queda sujeto a la habilidad del operador para posicionar la máquina. Existiendo el riesgo de diversos errores que puede cometer el humano, incluso involuntarios, causados principalmente por la dificultad de proyectar la trayectoria del vehículo. Es por esto que la automatización del posicionamiento previo a la aproximación a la pila resulta tan relevante y se visualiza como el siguiente componente de prioridad a implementar e integrar, seguido por la caracterización visual del punto de extracción y la retirada de la máquina una vez cargado el balde.

Bibliografía

- [1] H. Hamrin, W. Hustrulid y R. L. Bullock, «Underground Mining Methods and Applications,» de *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2001, pp. 3-14.
- [2] O. Medina, R. Quevedo y A. Avedaño, «Filosofía de Operación Load Haul Dump (LHD) Semi-Autónomo (SA),» CODELCO, Chile, 2016.
- [3] M. K. Petty, J. Billingsley and T. Tran-Cong, "Autonomous LHD loading," in *Proc., Fourth Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice.*, Toowoomba, 1997.
- [4] J. Marshall, "Towards autonomous excavation of fragmented rock: Experiments, modelling, identification and control," Queen's University, Kingston, Ontario, 2001.
- [5] A. Gustafson, «Automation of Load Haul Dump Machines,» Luleå University of Technology, Luleå, 2011.
- [6] M. Piérola y V. Arce, «Post Evaluación Proceso de Extracción con LHD Semiautomático Sectores Pipa Norte & Diablo Regimiento,» CODELCO, Chile, 2007.
- [7] J. Larsson, «Reactive Navigation of an Autonomous Vehicle in Underground Mines,» Örebro University, Örebro, 2007.
- [8] H. Durrant-Whyte y T. Bailey, «Simultaneous Localization and Mapping: Part I,» *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, n° 2, pp. 99-110, 2006.
- [9] T. Bailey y H. Durrant-Whyte, «Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part II,» *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, n° 3, pp. 108-117, 2006.
- [10] M. Piasecki, «Global localization for mobile robots by multiple hypothesis tracking,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, n° 1, pp. 93-104, 1995.
- [11] D. Filliat y J. A. Meyer, «Map-based navigation in mobile robots: I. a review of localization strategies,» *Cognitive Systems Research*, vol. 4, n° 4, pp. 243-282, 2003.
- [12] R. G. Brown y B. R. Donald, «Mobile robot self-localization without explicit landmarks,» *Algorithmica*, vol. 26, n° 3-4, pp. 515-559, 2000.
- [13] B. Schiele y J. Crowley, «A comparison of position estimation techniques using occupancy grids,» de *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994.
- [14] W. Burgard, D. Fox, D. Hennig y T. Schmidt, «Estimating the absolute position,» de *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 1996.
- [15] S. Engelson, «Passive Map Learning and Visual Place,» Ph.D. Diss., Dept. of Computer Science, Yale University, New Haven, 1994.
- [16] P. E. Hart, N. J. Nilsson y B. Raphael, «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,» *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4*, vol. 4, n° 2, pp. 100-107, 1968.
- [17] E. W. Dijkstra, «A Note on Two Problems in Connexion with Graphs,» *Numerische Mathematik*, vol. 1, n° 1, pp. 269-271, 1959.
- [18] S. M. LaValle, «Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning,» 1998.
- [19] S. Thrun y A. Bücken, «Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation,» de *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 1996.

- [20] A. Zelinsky, R. A. Jarvis, J. C. Byrne y S. Yuta, «Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot,» de *Proceedings of international conference on advanced robotics*, 1993.
- [21] M. De Berg, M. Van Kreveld, M. Overmars y O. C. Schwarzkopf, «Chapter 15: Visibility Graphs,» de *Computational Geometry*, Springer-Verlag, 2010, pp. 323-333.
- [22] M. De Berg, M. Van Kreveld, M. Overmars y O. C. Schwarzkopf, «Chapter 7: Voronoi Diagrams,» de *Computational Geometry*, Springer-Verlag, 2010, p. 147–163.
- [23] J. T. Schwartz y M. Sharir, «On the “piano movers” problem. II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds.,» *Advances in Applied Mathematics*, vol. 4, n° 3, pp. 298-351, 1985.
- [24] J. Canny, «The Complexity of Robot Motion Planning,» MIT press, 1988.
- [25] R. Brooks, «A robust layered control system for a mobile robot,» *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 2, n° 1, pp. 14-23, 1986.
- [26] R. C. Arkin, «Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation,» *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, n° 4, pp. 92-112, 1989.
- [27] H. Mäkelä, «Overview of LHD Navigation without Artificial Beacons,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 36, n° 1, pp. 21-35, 2001.
- [28] S. Thrun, W. Burgard y D. Fox, «A Real-Time Algorithm for Mobile Robot Mapping with Applications to Multi-Robot and 3D Mapping,» de *Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Vol. 1, pp. 321-328). IEEE., 2000.
- [29] S. Scheding, E. M. Nebot, M. Stevens, H. Durrant-Whyte, J. Roberts, P. Corke, J. Cunningham y B. Cook, «Experiments in Autonomous Underground Guidance,» de *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE. 1898–1903, 1997.
- [30] J. Cunningham, J. M. Roberts, P. I. Corke y H. Durrant-Whyte, «Automation of Underground LHD and Truck Haulage,» de *AusIMM Annual '98 “The Mining Cycle”*, 1998.
- [31] E. S. Duff, J. M. Roberts y P. I. Corke, «Automation of an Underground Mining Vehicle using Reactive Navigation and Opportunistic Localization,» de *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 151–156. Auckland, 2002.
- [32] J. M. Roberts, E. S. Duff, P. I. Corke, P. Sikka, G. J. Winstanley y J. Cunningham, «Autonomous Control of Underground Mining Vehicles using Reactive Navigation,» de *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3790–3795. San Francisco, USA., 2000.
- [33] J. A. Marshall, P. F. Murphy and L. K. Daneshmend, "Toward autonomous excavation of fragmented rock: full-scale experiments," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 562-566, 2008.
- [34] H. Almqvist, "Automatic bucket fill," Linköpings Tekniska Högskola, Linköpings, 2009.
- [35] A. A. Dobson, J. A. Marshall and J. Larsson, "Admittance Control for Robotic Loading: Underground Field Trials with an LHD," in *10th Conference on Field and Service Robotics (FSR)*, Toronto, 2015.
- [36] R. Filla, M. Obermayr and B. Frank, "A study to compare trajectory generation algorithms for automatic bucket filling in wheel loaders," in *Proceedings from the 3rd Commercial Vehicle Technology Symposium*, Kaiserslautern, 2014.

- [37] B. J. Ennis, "Unto dust shalt thou return," in *Powders and Grains 97*, Durham, North Carolina, 1997.
- [38] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*, New York: Wiley, 1943.
- [39] J. P. Bouchaud, M. E. Cates and P. Claudin, "Stress distribution in granular media and nonlinear wave equation," *Journal de physique I*, vol. 5, no. 6, pp. 639-656, 1995.
- [40] M. E. Cates, J. P. Wittmer, J. P. Bouchaud and P. Claudin, "Development of stresses in cohesionless poured sand," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, vol. 356, no. 1747, pp. 2535-2561, 1998.
- [41] M. Da Silva and J. Rajchenbach, "Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains," *Nature*, vol. 406, no. 6797, pp. 708-710, 2000.
- [42] H. M. Jaeger, S. R. Nagel and R. P. Behringer, "Granular solids, liquids, and gases," *Reviews of modern physics*, vol. 68, no. 4, pp. 1259-1273, 1996.
- [43] D. M. Mueth, H. M. Jaeger and S. R. Nagel, "Force distribution in a granular medium," *Physical Review E*, vol. 57, no. 3, pp. 3164-3169, 1998.
- [44] D. L. Blair, N. W. Mueggenburg, A. H. Marshall, H. M. Jäger and S. R. Nagel, "Force distributions in three-dimensional granular assemblies: Effects of packing order and interparticle friction," *Physical Review E*, vol. 63, no. 4, p. 041304, 2001.
- [45] J. M. Erikson, N. W. Mueggenburg, H. M. Jaeger and S. R. Nagel, "Force distributions in three-dimensional compressible granular packs," *Physical Review E*, vol. 66, no. 4, p. 040301, 2002.
- [46] L. Vanel, D. Howell, D. Clark, R. P. Behringer and E. Clément, "Memories in sand: Experimental tests of construction history on stress distributions under sandpiles," *Physical Review E*, vol. 60, no. 5, p. R5040, 1999.
- [47] J. Tejchman and W. Wu, "FE-calculations of stress distribution under prismatic and conical sandpiles within hypoplasticity," *Granular Matter*, vol. 10, no. 5, pp. 399-405, 2008.
- [48] J. Ai, J. F. Chen, J. M. Rotter and J. Y. Ooi, "Numerical and experimental studies of the base pressures beneath stockpiles," *Granular Matter*, vol. 13, no. 2, pp. 133-141, 2011.
- [49] Q. Zheng and A. Yu, "Why have continuum theories previously failed to describe sandpile formation?," *Physical review letters*, vol. 113, no. 6, p. 068001, 2014.
- [50] J. H. Snoeijer, T. J. Vlugt, M. Van Hecke and W. Van Saarloos, "Force network ensemble: a new approach to static granular matter," *Physical review letters*, vol. 92, no. 5, p. 054302, 2004.
- [51] S. Luding, "Stress distribution in static two-dimensional granular model media in the absence of friction," *Physical Review E*, vol. 55, no. 4, p. 4720, 1997.
- [52] J. Duran, *Sands, powders, and grains*, New York: Springer, 2000.
- [53] S. Herminghaus, "Dynamics of wet granular matter," *Advances in Physics*, vol. 54, no. 3, pp. 221-261, 2005.
- [54] M. Magnusson, "The three-dimensional normal-distributions transform: an efficient representation for registration, surface analysis, and loop detection," Örebro University, Örebro, 2009.
- [55] C. McKinnon and J. A. Marshall, "Automatic Identification of Large Fragments in a Pile of Broken Rock Using a Time-of-Flight Camera," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 935-942, 2014.
- [56] A. Madrid, "Determinación de granulometría y estrategia de extracción de material minero

- para LHD minero por medio de mediciones láser," Universidad de Chile, Santiago, 2015.
- [57] P. A. Mikhirev, "Design of automated loading buckets," *Soviet Mining*, vol. 22, no. 4, pp. 292-298, 1986.
 - [58] D. Seward, D. Bradley and R. Brasserie, "The development of research models for automatic excavation," in *Proc. of the 5th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Tokyo, 1988.
 - [59] D. W. Seward, D. A. Bradley, J. E. Mann and M. R. Goodwin, "Controlling an intelligent excavator for autonomous digging in difficult ground," in *Proc. of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Tokyo, 1992.
 - [60] P. K. Vähä, M. J. Skibniewski and A. J. Koivo, "Kinematics and trajectory planning for robotic excavation," in *Preparing for Construction in the 21st Century*, Cambridge, 1991.
 - [61] A. Hemami and F. Hassani, "An overview of autonomous loading of bulk material," in *26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Austin, Texas, 2009.
 - [62] A. Hemami, "Modelling, analysis and preliminary studies for automatic scooping/loading in a mechanical loader," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 6, no. 4, pp. 151-159, 1992.
 - [63] A. Hemami, "Study of bucket trajectory in automatic scooping with load-haul-dump loaders," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, vol. 102, no. sec. A, pp. 37-42, 1993.
 - [64] A. Hemami, "Study of forces in the scooping operation of a mechanical loader," *Transactions of the CSME (Canadian Society of Mechanical Engineers)*, vol. 18, no. 3, pp. 191-205, 1994.
 - [65] A. Boulard, «Implementation of an algorithm to perform the loading phase of a 1:5 scaled Load Haul Dump machine autonomously,» Advanced Mining Technology Center, Santiago, 2015.
 - [66] X. Shi, P. J. Lever and F. Y. Wang, "Experimental robotic excavation with fuzzy logic and neural networks," in *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, 1996.
 - [67] X. Shi, "Intelligent control of autonomous rock excavation: Theory and experimentation," 1996.
 - [68] X. Shi, F. Y. Wang and P. J. Lever, "Task and behavior formulations for robotic rock excavation," in *Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Monterey, 1995.
 - [69] P. J. Lever and F. Y. Wang, "Intelligent excavation control system for lunar mining system," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 16-24, 1995.
 - [70] S. Sarata, "Model-based task planning for loading operation in mining," in *Proc. 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawaii, 2001.
 - [71] S. Sarata, H. Osumi, Y. Kawai and F. Tomita, "Trajectory arrangement based on resistance force and shape of pile at scooping motion," in *Proc. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, Los Angeles, 2004.
 - [72] Y. Takahashi, R. Yasuhara, O. Kanai, H. Osumi and S. Sarata, "Development of bucket scooping mechanism for analysis of reaction force against rock piles," in *Proc. International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Tokyo,

2006.

- [73] O. Kanai, H. Osumi, S. Sarata and M. Kurisu, "Autonomous scooping of a rock pile by a wheel loader using disturbance observer," in *Proc. International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Tokyo, 2006.
- [74] L. Wu, "A study on automatic control of wheel loaders in rock/soil loading," 2003.
- [75] D. J. Rocke, "Control system for automatically controlling a work implement of an earthworking machine to capture material". United States Patent 5528843, Caterpillar Inc., 1996.
- [76] A. Dasys, L. Geoffroy and A. Drouin, "Sensor feedback control for automated bucket loading". United States Patent 5941921, Noranda Inc., 1999.
- [77] S. C. Budde, "Method and system for automatic bucket loading". United States Patent 6879899, Caterpillar Inc., 2005.
- [78] B. J. Alshaer, R. G. Ingram, J. J. Krone, J. K. Berry and J. J. Harris, "Automatic digging and loading system for a work machine". United States Patent 7555855, Caterpillar Inc., 2009.
- [79] A. A. Gordon, "Digging control system". United States Patent 8160783, Caterpillar Inc., 2012.
- [80] J. G. Fletcher, D. A. Jones, R. K. H. Chow y R. D. S. Hewavisenthi, «Excavation System Providing Impact Detection». United States Patente Publication No. 20170002541. Caterpillar, Inc., 5 January 2017.
- [81] J. G. Fletcher, D. A. Jones, R. D. S. Hewavisenthi y R. K. H. Chow, «Excavation system having adaptive dig control». United States Patente 09587369. Caterpillar, Inc., 7 March 2017.
- [82] J. G. Fletcher, D. A. Jones, R. D. S. Hewavisenthi y R. K. H. Chow, «Excavation System having Velocity Based Work Tool Shake». United States Patente Publication No. 20170002542. Caterpillar, Inc., 5 January 2017.
- [83] A. Dobson y J. Marshall, «Autonomous Loading Vehicle Controller». WO Patente 2015/109392. Atlas Copco Rock Drills AB, 30 July 2015.
- [84] S. E. Institute, «A Framework for Software Product Line Practice,» Carnegie Mellon University, 2012. [En línea]. Available: http://www.sei.cmu.edu/productlines/frame_report/softwareSI.htm. [Último acceso: 3 July 2017].
- [85] B. Gold-Bernstein y W. Ruh, *Enterprise Integration: The Essential Guide to Integration Solutions*, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2004.
- [86] O. S. R. Foundation, «ROS,» [En línea]. Available: <http://www.ros.org/>. [Último acceso: 30 Junio 2017].
- [87] N. Koyachi, S. Sarata and H. Ishimoto, "Pile Shape Measuring in Excavating and Loading by Wheel Loader," in *Proceedings of the 22nd MPES Conference*, Dresden, 2014.
- [88] M. Magnusson and H. Almqvist, "Consistent pile-shape quantification for autonomous wheel loaders," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, 2011.

Anexo A:
Entrevista a instructor de operadores de LHD

Entrevista operador LHD CODELCO – División El Teniente

Nombre: Pablo Chavez
Cargo: Instructor y supervisor en operación manual y remota.
Fecha: 05/05/2016

Notas Fase Libre

Procedimientos de operación (al empezar el turno): Análisis de riesgos del trabajo (ART).

- chequeo completo del equipo.
- chequeo visual de las calles (que no hayan cañerías sobresaliendo, por ejemplo).
- chequeo visual de los puntos (caminando).
- confinamiento del área en el que va a trabajar.
- ver la granulometría de los puntos.
- ver si la iluminación y ventilación es correcta.
- si están los rociadores como corresponde.
- poner una cinta de bloqueo en los accesos a la calle.
- dependiendo de lo que encuentra cerrar los puntos no operativos.
- llenar un papel con la información correspondiente a los ítems anteriores.

Los operadores van con indicación de cuánto tienen que sacar y dónde. El sistema puede detectar que fue a un punto a través de tags instalados, con esto se cuenta cuántas lleva. El operador puede sacar más baldadas de las indicadas, pero esta información se registra como una cuenta negativa. Si el operador completa su cartilla de tiraje y le falta mineral, el operador puede pedir al supervisor sacar más.

Si hay muchos puntos no operativos de los que le tocaban, es mejor cambiar la pala de calle y darle prioridad a la reducción secundaria.

La condición del punto (granulometría) no está por sistema y nadie se lo informa previamente al operador, él obtiene esta información por simple inspección visual.

Si el operador se encuentra con una condición de humedad relevante, tiene que parar la extracción y dar aviso al supervisor, aún si todavía le quedaban baldadas por sacar.

Condición de operación de los puntos:

- Abocado: Existe un talud de saca en la visera (bóveda) del punto. Punto operativo, independiente de la granulometría. Se puede dar que el material está apretado y al sacar la primera baldada o mover una roca se suelta.
- Colgado: Cuando corta luz (existe una abertura) entre la visera del túnel (es un túnel de 5m de largo) y la base del mineral. Punto no operativo. El procedimiento indica construir una contención con material de otros puntos entre 1.5 y 2m de altura.

A veces pasa que por la humedad la saca se aprieta y pareciera que hubiese un muro de arcilla, pero mientras no esté cortando luz (colgado) sigue operativo y se puede seguir raspando y tratar de moverlo. También si hay una colpa, el operador trata de moverla y si no puede va a reducción secundaria (se cierra el punto).

El sobre tamaño de las colpas va a depender del diseño de la mina, según la planificación minera se dimensiona una cierta granulometría, sobre tamaño pasa a ser cuando el diseño (tamaño LHD, pique, martillo) no da abasto para la roca. P. Ej. Un LHD de 7 yardas puede máximo con 1m³.

Dependiendo de granulometría van a variar los tiempos de carga y el volumen.

Los tiempos y los ciclos de trabajo los determinan la granulometría, estados de las carpetas, estado del equipo y experticia del operador.

No se requiere velocidad para lograr una mayor tasa de extracción, sino constancia. Uno que anda más rápido podría requerir más tiempo para limpiar la calle.

Un balde se considera lleno cuando va a ras (con granulometría fina).

Si el balde se sobrellena hay que sacudirlo.

El LHD puede meter el balde hasta el segundo marco de contención de la bóveda (2/3 del túnel), más allá de eso es peligroso.

La granulometría en la carga principalmente se usa para determinar si el punto está operativo o no.

El punto fácil es uno que está con piedras molidas (tierra de hojas). Se meten y prácticamente no tienen que hacer ninguna maniobra.

Cuando hay piedras más grandes cuesta un poco más pero con la misma técnica llenan el balde.

El estado de la cuchilla (parte del estado del equipo) y su diseño es determinante en cuánto va a demorar en cargar.

Generalmente la partida (inicio del turno) es más lento porque el operador va evaluando individualmente los puntos.

Si hay condiciones especiales en los puntos (desechos industriales), el jefe de turno le informa al operador al comienzo.

Si el operador encuentra situaciones inusuales (como desechos industriales) informa por consola lo que encontró. Se tiene en mente que el tiempo subsecuente para tratar esa situación, como mover el material, no se considera operativo.

El objetivo de tonelaje de la mina es por día y por mes. Por lo que si en un turno se tienen muchos problemas se intenta apurar el turno siguiente u otro día.

Si el operador tiene los piques de traspaso llenos, usan ese tiempo muerto para completar otras tareas como hacer muros de contención, limpiar la calle, mover los desechos industriales o colpas grandes que tienen puntos detenidos.

Usualmente se necesita limpiar la calle cada 2 o 3 baldadas.

Por su experiencia el operador sabe qué puntos son mejores que otros (condición de las carpetas, posible presencia de desechos industriales, granulometría) y la operación de las palas (las mañas de cada una).

Al principio del turno, como es más lento y se requiere disponibilidad de material para los ferrocarriles, el operador suele ir a los puntos con mayor granulometría para llenar los piques rápido.

Si durante la operación hay mucho camote en un pique, el operador rellena con menor granulometría para darle tiempo al martillero y que haya continuidad del proceso. Intercala entre camote y fino.

Dependiendo de la humedad del mineral, los piques se pueden comenzar a “enlampar” (se le pega barro a las paredes y se endurece como roca). Entonces el operador recibe instrucción de tirar algunas baldadas de camote para que el golpe limpie el pique.

Si el operador observa una condición que no permite la operación en un punto, avisa y lo marca en el sistema. Dependiendo de cada caso, se le reasigna otro punto.

El operador llega siempre con la misma velocidad a un punto, aunque sea la primera vez que lo ve. Tiene tiempo suficiente para reaccionar en el camino ante situaciones anómalas. Nunca se detiene a evaluar, porque alcanza a frenar.

A veces se encuentran rocas enterradas, en ese caso el operador intenta sacarla. Si no puede, evalúa la situación y decide si reportarlo como no operativo y que pase a reducción secundaria.

El LHD debe llegar en primera a atacar al punto.

Dependiendo de lo que se lleva en el balde es a la velocidad a la que se desplaza el LHD y también a veces a qué pique de traspaso lo descarga. Los operadores dejan un pique para tirar puro fino y mantener al martillero ocupado en el otro. También se da que si un pique está lleno hay que ir a tirarlo al otro.

Un pique hace 23 baldadas y un tren se carga con 3 piques.

Se intenta llenar los piques intercaladamente.

Al entrar al punto se hace con la pala abajo (usualmente se baja antes de la curva).

Al mover los puntos de extracción adyacentes se puede llegar a descolgar un punto (se nota porque aparece un nube de polvo). El operador entonces puede ir y sacar un par de baldadas de ese punto, suficiente para que luego vayan los de reducción secundaria a explotar (porque tiene que haber una colpa grande que era la que tenía colgado el punto).

Si hay piedras más grandes que las demás en un punto, entonces el operador evalúa si es una piedra que se puede romper (unas más negras) o si es muy dura (más blancas, cuarzo). Las que se quiebran puede tirarlas por el pique y el martillo las rompe, pero las duras las mueve a otros puntos cerrados. En general si no sabe qué tipo de piedra es, lo mejor es no tirarla al pique.

Si al operador se le agotan los puntos durante la operación (por estado no operativo), él puede pedir que lo cambien de calle. Se inicia entonces el procedimiento para cambiarlo de calle.

El operador pocas veces tiene que bajarse del vehículo. En general todas las situaciones las puede manejar desde dentro de la máquina.

Para cargar:

- Levantar el boom 10cm, inclinar el volteo para que la pala quede a ras de piso.
- Enterrarse en la saca.
- Bajar el boom y subir el volteo.
- Con el volteo se recoge el balde de a poco. Intercalar entre enterrarse hasta que ya no avance más y hacer movimientos cortos para recoger el balde (esto también mantiene la tracción apoyada adelante).
- Mantenerse en primera siempre acelerando al máximo.
- Utilizar el bloqueo de la dirección (máxima fuerza al balde) para destrabar la pala cuando atasca con una piedra. Se usa con una duración muy breve.
- Si se levanta mucho material, se puede levantar la cola. En ese caso hay que liberar peso volteando el balde hacia el otro lado.
- Cuando ya ha penetrado suficiente, se levanta un poco la pala (60cm), volteando el balde para recoger todo el material que se había levantado (“arremangado”) con la operación anterior.
- Se retrocede el LHD. Sacude los excesos de material del balde y baja el boom.
- Para desplazarse se recomienda llevar el boom un poco levantado para no golpearlo contra el piso.

La altura del túnel en el punto es de 4m y fracción. Afuera es un poco más alto pero hay infraestructura que podría dañarse si se llevan rocas muy grandes en el balde.

El carguío es siempre igual. Puede demorar más o menos dependiendo de las condiciones del punto.

Algunas minas tienen dos piques por calle y otras tienen uno para varias, entonces tienen que interactuar con otros LHD.

Los operadores compiten entre ellos por quien tira más saca, lo cual es una práctica pueril porque el objetivo de tonelaje es por mes para la mina entera, no por operador. Lo importante es que se desempeñe bien, pero no quién hace más.

En el traslado importa que se lleva en el balde. Si es fino no pasa nada si se cae un poco. Si hay piedras grandes es más peligroso que se caigan en el camino. Si se lleva una roca grande hay que tener cuidado de no dañar la infraestructura en el techo y al botar hay que hacerlo lento para no romper la parrilla.

Un carguío rápido se hace en 15s desde que se metió en la saca hasta que sale retrocediendo. Normalmente demora entre 20-40s.

Un ciclo de trabajo considera 17 baldadas por hora (carga, desplazamiento y vaciado).

La distancia que se tiene que desplazar el LHD entre la carga y el vaciado es relativa pero va entre 100-300m.

Los LHD tienen 42.5° de quiebre hacia cada lado, lo cual debe demorarse 7.2s bajo condiciones normales de presión y temperatura del aceite hidráulico.

Q&A Fase Dirigida

- ¿Qué información tiene del punto antes de comenzar el carguío?

La que obtiene de la inspección previa al inicio del turno (caminando), la que le entrega el supervisor antes de empezar el turno y la que le da el sistema de los puntos habilitados.

- Descripción general de sus etapas de carguío y de las transiciones.

Inspección visual cuando va llegando al punto. Ejecutar la carga. Sacar el balde. Sacudir y retirarse. Las transiciones son dinámicas (con el vehículo en movimiento). La aceleración es siempre al máximo 1700 – 1850 RPM. Sólo se detiene para poner marcha atrás.

- ¿Ha cargado con máquinas de distinto tamaño?

Sí. Todas son básicamente iguales, sólo varían los accesorios y las dimensiones. La forma de cargar no varía.

Etapa 1: Evaluación visual

- ¿Cuál es la información visual que obtiene del punto antes de comenzar el carguío?

Se fija en la condición del punto, si está operativo o no. La granulometría no importa mientras el punto esté operativo. De la máquina sólo se fija en parámetros si se anuncian como una alerta (nivel 1: advertencia que no afecta inmediatamente la operación, nivel 2: el operador tiene que revisar, nivel 2s: hay que parar o cambiar el modo de operación, nivel 3: hay que parar. 2s y 3 van acompañados de alarma sonora)

- ¿Cómo se ve su punto ideal?

El que esté bien molido (tierra de hojas), hacer la carga es fácil. Pero el operador igual se aburriría porque la gracia está en la dificultad de cargar.

- ¿Influye el estado de la carpeta de rodado?

Sí. Si hay hoyos hay que pasar más lento o esquivarlos.

- ¿Qué decisiones toma según lo que ve? Posibles decisiones:

➤ No hacer el carguío. ¿Por qué? ¿Qué acciones toma cuando no puede cargar?

Informar en el sistema que no está operativo por rocas grandes, desecho industrial demasiado grande, barro o colgadura.

➤ Mover o cargar rocas grandes. ¿Cuál es el criterio para definir tamaños? (para un geólogo 1m³ es sobre tamaño).

1m³ es la regla, pero hasta 1.5m³ lo cargan igual. Igual depende del tipo de roca. También la condición del martillo podría llevar a la indicación de intentar sólo tirar fino por el pique.

- Acondicionar el punto.

(Sí, mover rocas grandes a otros puntos si se pueden levantar pero no tirar)

- Si se ve fácil, hacer el carguío.
 - ¿Puede inferir fuerzas en el punto a partir de lo que ve? ¿Decide cuánto meter la pala dependiendo de cómo se ve? (historia del punto)

Recién cuando entra siente lo apretado que está, porque no sabe lo que hay debajo. Pero el operador entra y se pone a cargar. Él sabe la capacidad del equipo y queda a su criterio qué es lo que puede o no puede tirar.

Etapa 2: Aproximación

- ¿Cómo ataca el punto? Posición, velocidad, rpm, ¿otra variable?

Recta (articulación derecha) y en primera, acelerada a full. Boom 10cm arriba y el balde pegado al piso. RPM sobre 1730.

- ¿Cómo sabe cuál es la posición de la pala? ¿Tiene indicadores para conocer la posición antes y durante el carguío?

No hay indicador. Información sólo visual. Percibes si te clavas, se levanta la máquina, patinas.

- ¿Apoya la pala en el piso? ¿Qué pasa si queda muy “cargada” contra el piso y se tranca?

Sí se apoya la pala y se sabe que se apoyó porque se siente el contacto.

- ¿Es importante la experiencia para no realizar varias aproximaciones?

En general te das cuenta cuando la pala se apoyó en el piso. Uno puede retroceder si es necesario, por ejemplo si había una piedra y la pala no llegó a tocar el piso.

- “No cargar quebrado”, ¿es muy importante? ¿Les importa el ángulo de la dirección?

Sí, es importante, porque pierde efectividad porque pierde tracción al estar quebrado. Si al chocar con la saca se enchueca la máquina se mueve un poco la dirección para acomodar la dirección y que el empuje se haga hacia adelante.

- ¿Hay alguna condición que le haga reevaluar sus decisiones en base a la aproximación?

Si está molido por encima pero debajo hay una piedra y uno no se puede meter, tienes que retroceder y raspar un poco por encima para ver qué es lo que hay, pero visualmente durante la aproximación nada.

Etapa 3: Carga

- ¿Cuándo comienza el carguío qué siente? (interactuando).

Sólo se usa información visual, tú ves cuánto está penetrando el balde, si están patinando las ruedas o inclinándose la máquina. No se usa información de vibraciones u otras.

- ¿Qué información obtiene cuando está cargando?

Sólo información visual.

- Cuáles son los movimientos que hace? (levante, volteo, desplazamiento)

Levantar el boom un poquito, bajar el balde, entrar en la saca, baja el boom y recoge con el balde de a poco. Cuando está lleno se sube el boom mientras se recoge el balde para retirarlo, se sacude y se baja el boom.

- ¿Siente patinaje? ¿Qué tan importante es el patinaje?

Se ve el patinaje, es importante porque resta tracción. Se da porque clavaste mucho el balde o se levantó la cola.

- RPM vs. velocidad

RPM al máximo, la velocidad va a variar por el uso de la función para darle toda la fuerza al balde, pero no es una variable en la que uno se fije. Uno sale de la zanja a 5 km/h, que es todo lo que da el vehículo.

- ¿Aceleran para cargar?

Si full.

- ¿Mueven el levante y el volteo al mismo tiempo (pierde fuerza)? ¿O alternadamente?

Depende del tipo de saca, pero lo que se trabaja más es el volteo. En todo caso no hay problema con activarlos simultáneamente, sólo que no se hace mucho durante el carguío.

- Si tiene una estrategia predefinida y algo sale no como estaba planeado. ¿Qué le indica que su estrategia no está funcionando? (sonidos, presiones, tracción, fuerza que ejerce el punto en contra) ¿Cambia la estrategia o no se puede cambiar? ¿Qué decisiones toma cuando quiere cambiar la estrategia?

Los indicadores son por parte del equipo. Por ejemplo si el equipo tiene poca fuerza uno se fija si hay alguna variable en un rango distinto que explique el comportamiento. Uno carga lo que tenía que cargar y luego revisa bien la situación, quizás haya que cambiar el modo de operación (por sobre temperatura por ejemplo).

- ¿Se atora el balde? ¿Qué hace si se atora?

Si carga mucho sí se puede levantar la cola. Si dejas de acelerar se puede destrabar, también levantando un poco el balde.

- ¿Cómo define un carguío exitoso? ¿Tiempo, volumen?

Ambas cosas, uno tiene como objetivo llenar el balde e intenta demorarse lo menos posible, pero se pueden intentar un par de veces. Incluso si solo carga la mitad se puede ir, mientras no cargue siempre la mitad del balde.

- ¿Puede ver cuánto carga?

Puede ver la saca en el balde cuando aparece dentro del campo visual. Si no se ve saca mejor intentarlo de nuevo.

- Cuchareo. ¿Como lo hacen? Duración, frecuencia, etc...

Es relativo, depende de la saca. Si es fina no necesita mucho trabajo. Pero si la saca está muy complicada no vale la pena perder tanto tiempo en ella.

El cuchareo es el movimiento de la pala dentro de la saca.

- ¿Puede hacer varios intentos?

(Sí.)

- ¿Cómo siente que se distribuyen las fuerzas en el punto? ¿Las de adelante son más fáciles? ¿Atrás más difícil? ¿Hasta donde puede hundir el balde sin que sea imposible seguir moviéndolo (atasco)?

Al fondo es más pesado. Si el material comienza en el fondo es porque está medio trancado. Sólo es imposible seguir moviendo el balde si se te viene el cerro encima porque se descolgó. El balde es capaz de penetrar hasta hundirse completamente en la saca y no quedar atascado.

Etapa 4: Retirada

- Uso del cuchareo. ¿Cuándo lo hace? ¿Donde lo hace?

(Es la sacudida del balde, no cuchareo.) Al retirarse, saliendo de la bóveda. Tiene que quedar dentro de la bóveda.

- ¿Cuándo saca el balde, hace algo especial para preparar el siguiente carguío? ¿Para que fluya el material? Si está medio colgado, ¿“cucharean” más arriba?

No, sólo se acomoda. Lo que sí importa es alternar entre sacar de la izquierda y después de la derecha en la siguiente baldada para mantener la saca uniforme. El posicionamiento en todo caso no es muy fino sino que uno apoya el balde en uno de los lados.

- Cuánto tiempo demoran en cargar: mínimo, promedio y máximo.

Entre 20 y 40 segundos. En condiciones normales. Si hay una roca grande intentan un par de veces y si no pueden dejan el punto.

- ¿Sucede que el balde queda muy lleno y por seguridad hay que sacarle algo? ¿Cómo se hace?

Sacudida. Si llevas algo que puede caer lo botas en el mismo punto. Si hay una piedra muy grande además de la saca, se voltea un poco el balde hasta que caiga la piedra. Si la piedra no cae con esto entonces tampoco va a caer por el camino.

Extras

- ¿Ha cargado con máquinas de distinto tamaño? ¿Cuáles son las diferencias?

Sí, prácticamente iguales.

- ¿Según la máquina que ocupa, utiliza alguna característica especial? ¿Alguna favorita y por qué?

El bloqueo de transmisión y la estabilización de la posición del balde durante el desplazamiento (la última solo en Caterpillar).

- Distribución de rocas. ¿Dependiendo de la edad del punto, cómo cambia la granulometría? ¿Cuándo es más fácil/difícil? ¿Qué tan constantes son estas condiciones? ¿Sucede mucho que cuando debiera ser A, hay B?

Sí, cambia la granulometría. Al comienzo es molido por la explosión, poco después es más grande, con el tiempo las rocas que vienen de más arriba con la fricción disminuye la granulometría. También las piedras van siendo más duras con el tiempo. La granulometría es cíclica pero más o menos estable en el tiempo.

- Efecto de las nueces brasileiras. ¿Flotan las colpas? Si hay colpas hundidas, ¿cómo las detecta?

No, las colpas se entierran. Uno las encuentra cuando choca contra ellas o cuando las ve bajando por el punto.

- ¿Qué operaciones durante el carguío son peligrosas? ¿Qué cosas hacen y que no se debería por seguridad, pero sin las cuales el punto pasaría trancado o en reducción secundaria?

Algunos operadores le pegan a los puntos colgados y después arrancan a ver si se viene o se meten más allá de los 2/3 del largo de la bóveda permitido.

- Dependiendo de lo que importa más, si llenar el balde o hacerlo rápido. ¿Como lo harían bajo condiciones diferentes? Si lo más importante fuera llenar el balde, ¿harían algo distinto en las etapas anteriores?

(Ambas son importantes, pero el objetivo es llenar el balde en cada carga.)

Nota: El operador probablemente hace muchas más cosas de las que está consciente que hace en cuanto a cómo enfrenta las distintas condiciones del punto.

Anexo B:
**Reporte descriptivo del proceso de carga con LHD en “Block
Caving” según datos recopilados de la entrevista realizada**

Informe

Descripción del proceso de carguío con LHD en Block Caving

Preparado por: Carlos Tampier C.

Revisado por: Javier Ruiz del Solar.

Santiago, 09 de junio de 2016.

Tabla de Contenidos

Introducción	3
Panorama global	3
Cartilla de tiraje y sistema de despacho	4
Preliminares	4
Variables relevantes	5
Condiciones de los puntos de extracción.....	6
Procedimiento de carga	8
Factores que dificultan la operación de carga	10

Introducción

La extracción de mineral con LHD en los túneles subterráneos de una operación de Block Caving es un proceso de naturaleza intrínsecamente compleja, debido a la serie de sistemas que tienen que interactuar y coordinarse, y la cantidad de variables que se deben considerar en la toma de decisiones durante la operación.

El presente informe describe el anterior proceso de acuerdo a la información recopilada en base a entrevistas realizadas a Pablo Chávez, instructor y operador de LHD en División El Teniente, CODELCO, Chile, con fechas 20 de abril y 05 de mayo de 2016.

Panorama global

El objetivo de los LHD es cargar roca fragmentada, de granulometría, humedad y dureza variable, desde un punto de extracción, transportarla a través de una calle de la mina y vaciar el balde en un pique de traspaso, los cuales finalmente se utilizan para llenar un ferrocarril que saca el mineral al exterior. Los piques tienen rejillas que sólo permiten el paso de la roca bajo un tamaño determinado. El material que es lanzado y no pasa la rejilla debe ser quebrado con un martillo pica rocas.

Sin embargo, el ciclo anterior no está exento de imprevistos. Durante su turno, el operador re-planifica continuamente el siguiente lugar del que debe sacar material dependiendo de la carga de trabajo que tenga el martillo y de las condiciones problemáticas que se presenten en las zanjas, como barro, colgaduras, sobre tamaños, etc.

También ocurre que el o los piques de traspaso se llenan, lo que genera que el operador disponga de un tiempo muerto en su actividad cíclica. Este tiempo no suele ser ocioso, sino que se usa para completar otras tareas pendientes, como por ejemplo limpiar las calles de la sección de la mina que se está utilizando (usualmente esto debe hacerlo cada 2 o 3 baldadas), construir barreras de contención para los puntos que se haya identificado como no utilizables y peligrosos (aunque el procedimiento indica hacerlo inmediatamente luego de identificada una condición insegura), mover rocas demasiado grandes o escombros a puntos cerrados para habilitar otros, etc. Detalles sobre estas condiciones se aclaran más adelante. A continuación se ahonda en las distintas tareas y características propias de la operación.



Cartilla de tiraje y sistema de despacho

Para cada turno el operador cuenta con una asignación de puntos de extracción y la cantidad de baldadas que debe retirarle a cada uno, conocida como cartilla de tiraje (“cartir”). El “cartir” está incorporado en una aplicación del computador a bordo, llamada sistema de despacho, la cual además tiene la funcionalidad de contar automáticamente la cantidad restante de visitas programadas para una zanja, pudiendo incluso señalar la sobre extracción mediante un conteo negativo. Esto último se realiza a través de “tags” instalados en los túneles.

Se incluye también, como parte del software, una consola de mensajes de texto para interactuar con el supervisor en forma remota en caso que sea necesario avisar de condiciones especiales que afectan a las zanjas. Por ejemplo, la aparición de escombros de los antiguos niveles superiores de la mina. Éstos requieren un tratamiento especial, por lo que resulta conveniente reportar que se presentará una demora en la operación normal.

De suscitarse un problema que impida el acceso o extracción de un punto, el sistema también le permite al operador indicarlo en pantalla, luego de lo cual queda a criterio del supervisor generar una nueva “cartir”, ya sea dentro de la misma calle, o una nueva en caso de que la actual tenga muchas zanjas inoperables. El cambio de calle se debe efectuar cumpliendo un protocolo determinado, el cual incluye la presencia de una escolta para el LHD, entre otras políticas.

Finalmente, cabe hacer énfasis en que el sistema de despacho no permite al operador modificar en línea el estado de los distintos puntos, sino solamente reportar condiciones que lo afectan. La modificación queda a cargo del supervisor. Tampoco se puede encontrar en el sistema la granulometría o humedad, pero sí la ley estimada del mineral de cada una de las zanjas de la mina

Preliminares

Al comenzar el turno, el operador, realiza un procedimiento llamado Análisis de Riesgos del Trabajo (ART), el que consiste en una inspección de las condiciones del equipo y el lugar de trabajo, las que se reportan en papel bajo un formato determinado. Es importante mencionar que estas actividades se realizan a pie. Entre ellas se consideran:

- Confinamiento del área en la que se va a trabajar.
- Chequeo completo del equipo (LHD). Inspección visual y revisión de niveles en el tablero.
- Chequeo visual de la calle. Constatar que no haya infraestructura dañada.
- Chequeo visual de los puntos de extracción y estado de las carpetas de rodado. Constatar puntos habilitados y no habilitados, previamente informados por el sistema, y reportar los puntos cuya apariencia indique condiciones inseguras. Sirve también para conocer la granulometría y aspecto de cada uno.
- Constatar que la iluminación y ventilación es correcta y los rociadores están en buen estado.



Variables relevantes

Las dos principales variables que el operador evalúa del aspecto visual de los puntos de extracción son la granulometría y la humedad. La primera le sirve para planear el orden en que visita las distintas zanjas disponibles y la segunda para identificar potenciales peligros. Además ambas influyen en el grado de dificultad de la excavación.

Una pila con fragmentos más gruesos ofrece una mayor resistencia a la penetración, dificultando el proceso de carga. Además el operador de LHD tiene que, normalmente, alternar entre el volcado de material con mayor y menor granulometría en un pique de traspaso, de modo de mantener el martillo con una carga constante de trabajo. Es por esta razón que la variable resulta tan fundamental en la planificación. Esto es aún más crítico al comienzo del turno, cuando la tarea es llenar los piques de traspaso lo más rápido posible, de modo que cuando llegue, el ferrocarril se pueda cargar completamente con mineral, lo cual se facilita con piedras más grandes. Otro ejemplo es que en ocasiones es necesario lanzar rocas de gran tamaño para romper acumulaciones de barro que se cementan en la salida de los piques.

En el caso de la humedad, una condición excesiva de esta variable refleja la presencia de filtraciones importantes de agua a través del quiebre del yacimiento, lo que alerta de una posible acumulación de barro a presión y suponiendo un riesgo asociado de desestabilización de la roca. Por otra parte material húmedo tiene una mayor cohesión y por lo tanto se requiere mayor esfuerzo para insertar un balde dentro de él.

Condiciones de los puntos de extracción

Desde el punto de vista de la operación, planificación y asignación de recursos existen dos categorías en las que se pueden clasificar las zanjás: habilitado (abierto) y no habilitado (cerrado). Para el operador, sin embargo, existen otras condiciones que utiliza para caracterizar más precisamente el origen de su clasificación, particularmente en los puntos cerrados.

1. **Abocado:** se llama así cuando existe un talud de mineral (también referido popularmente como “saca”) que se extiende continuamente desde el quiebre del yacimiento hacia la mayor parte de la bóveda del punto de extracción. Un punto en estas condiciones está operativo.
2. **Colgado:** se denomina a la condición de atasco del mineral que cae a través del quiebre del bloque, el cual ya no es capaz de fluir hacia la bóveda del punto de extracción y debe ser detonado con explosivos para volver a dejarlo operativo. También se puede dar que el movimiento de las zanjás adyacentes y su consecuente flujo de rocas produzca el efecto geológico necesario para que se descuelgue. En cualquier caso, el procedimiento indica que al identificar un punto como colgado, el operador, debe inmediatamente reportarlo por pantalla en el sistema y construir un muro de contención de entre 1.5 y 2m de altura con material extraído de otra zanja. El objetivo del muro es que cuando vuelva a fluir la roca y ésta se precipite hacia el túnel, exista una barrera que contenga la salida de mineral hacia la calle, la cual ocurre con gran potencia y es capaz de causar accidentes fatales. La forma de reconocer tempranamente este estado inoperable es que se forma una cavidad entre la visera y el talud de mineral al fondo de la bóveda.
3. **Camoteado:** se refiere a una zanja que presenta rocas con sobre tamaño conocidas como “colpas”. Las colpas pueden encontrarse tanto en la superficie del talud de mineral, como ocultas bajo el mismo. Cuando, durante la carga de mineral con el LHD, se encuentra una roca grande enterrada, el operador intentará maniobrar para cargarla, lo cual incluye retirarse y volver a intentarlo una segunda oportunidad si fuera necesario. De no tener éxito recogerá únicamente el mineral frente a ella, para dejarla expuesta. Además, el operador, informará de la situación mediante el sistema de despacho a bordo. En caso de que se logre cargar una roca con sobre tamaño, queda al criterio y experiencia del operador si ésta se puede botar en el pique de traspaso (de ser una roca frágil que el martillo pueda reducir) o depositar en algún otro punto de extracción que no se encuentre habilitado. El destino final de las zanjás camoteadas es pasar a reducción secundaria, es decir, fragmentación mediante explosivos.

4. Con escombros: los escombros industriales (“risen”) son consecuencia directa de la forma de explotación en la minería subterránea, en la que una vez agotado el yacimiento en un nivel de extracción, el siguiente nivel se construye a mayor profundidad, detonando la roca arriba del mismo. Por esta razón ocurre que eventualmente aparecen los restos de las construcciones demolidas junto al mineral. Dado que el “risen” está ligado a una condición geográfica, el operador sabe qué lugares tienen una mayor probabilidad de presentarlo. Los problemas derivados de este fenómeno son fundamentalmente dos. El primero es que algunos materiales, que el LHD puede cargar, no pueden ser triturados por el chancador, produciendo un atasco de la máquina y consecuente paralización de la operación. En este caso el operador podría dejar los escombros en una zanja cerrada para su posterior remoción con otros equipos. El segundo es cuando los residuos no caben en el balde, ante lo cual el operador informa por sistema y el supervisor cierra el punto de extracción para su posterior tratamiento (notar que el cierre se refiere a un estado lógico, reflejado sólo en el software y no físicamente en el lugar).
5. Con barro: el barro es una de las condiciones más peligrosas que se encuentran en Block Caving. La filtración de agua a través del quiebre del yacimiento produce una acumulación de lodo bajo presión, contenido por la roca fragmentada. Ésta puede detectarse ya sea por el flujo de líquido a través del mineral o por una condición de humedad importante en el mismo. Ante la detección de esta situación el operador debe informar al supervisor (siempre a través del sistema de despacho) y mantenerse alerta cuando circule cerca de la zona afectada. Además una práctica común cuando existe flujo de barro es dejar una colpa en el lugar, más que nada para evaluar la evolución del mismo a través del desplazamiento de la roca.

En cualquiera de los estados anteriores, aunque particularmente aplicado a los puntos colgados, la norma de seguridad indica que el LHD puede adentrarse a un máximo de 2/3 del largo de la bóveda, indicado visualmente por aproximadamente el segundo marco de fortificación de la misma.



Procedimiento de carga

La Figura 1 muestra el esquema de un LHD, con la nomenclatura de sus principales componentes y grados de libertad. Éstos se mencionan a continuación para presentar los pasos y secuencia de acciones que utilizan comúnmente los operadores para cargar. Todos los pasos se realizan con el cambio en primera y aceleración al máximo, con dirección de movimiento hacia adelante o hacia atrás según corresponda, lo cual lleva al motor a un rango entre las 1700 y 1850 RPM. Las transiciones entre distintas fases o toma de decisiones se realizan todas en movimiento, ya que de observarse alguna condición anormal, hay suficiente tiempo para evaluarla y detener el vehículo si es necesario. Si no se dan eventos inesperados, el proceso entre el contacto con la pila de rocas y la retirada dura entre 20 y 40 segundos.

- a) Aproximación: se levanta la pala (*boom*), hasta que el balde quede a aproximadamente 10cm del suelo, y se inclina este último hasta que su cuchilla quede apoyada en el suelo. Se hace de esta manera para generar un contacto cerrado contra el piso, de modo de recoger o arrastrar cualquier piedra en el camino delante del LHD. Esta fase se esquematiza en la Figura 2a.
- b) Excavación: luego de la inserción inicial en la “saca”, se baja el boom y retrae un poco el balde. La penetración en el mineral continúa con movimientos cortos e intermitentes del balde en la dirección de retracción, pudiendo además ser acompañados por el mecanismo de neutralización de la transmisión, el cual entrega toda la potencia hidráulica a la pala, anulando momentáneamente la tracción. Esta secuencia permite insertarse en la pila mientras se mantiene la tracción en el tren delantero. Cuando las características granulométricas dificultan el avance, una oscilación de la punta del balde (rotación alternada entre los sentidos de giro positivo y negativo), llamada “cuchareo”, puede ayudar a fluidificar la roca, pero se debe tener cuidado con el posible derrape de las ruedas delanteras producida por un volteo hacia abajo. En ocasiones este volteo hacia abajo puede ser deseable, ya que permite recuperar la tracción en las ruedas traseras, si el LHD llegara a inclinarse por causa de sobrecarga de peso en la parte frontal. Durante toda esta fase el movimiento del *boom* casi no es utilizado, pero puede ser necesario subirlo para mejorar el agarre del tren delantero. Además es muy importante que el carguío se realice con la articulación de la máquina derecha, de modo que toda la tracción se traduzca en fuerza de avance hacia de la pila. Ocasionalmente puede suceder que al hacer contacto con la roca, el LHD cambie su orientación, siendo necesario el movimiento de la articulación para ajustar la dirección de ataque. La Figura 2b muestra parte de esta etapa.
- c) Levante: una vez que el balde se encuentra lo suficientemente lleno, éste se retrae, acompañado por el levante del *boom*, aproximadamente hasta que el primero quede a 20cm del suelo. Lo anterior permite recoger la última porción de mineral que se encuentra sobre el balde y elevarlo lo suficiente sobre del talud de rocas como para iniciar el retroceso sin arrastrar material (ver Figura 2c).



- d) Retroceso y sacudida: se mueve el LHD una pequeña distancia hacia atrás y se sacude el balde con movimientos cortos de volteo para dejar caer el exceso de carga. En caso de haber recogido alguna roca demasiado grande para ser transportada en forma segura, también se puede inclinar el balde lo suficiente para botarla. Este paso se ilustra en la Figura 2d.
- e) Retirada: se baja el *boom*, cuidando de dejarlo un poco levantado para que durante el transporte no golpee el suelo, y se procede a salir del punto de extracción. La velocidad de retirada, así como en general del transporte y la descarga, dependen de la granulometría del mineral acarreado y especialmente si se llevan “colpas” (mayor granulometría requiere mayor cuidado, por lo que se recomienda ir más lento para no dejar caer rocas accidentalmente). La Figura 2e hace referencia a esta última fase.

Además de los pasos anteriores, una consideración muy importante es que el mineral se tiene que retirar de forma homogénea a lo ancho del talud, ya que de lo contrario se forma una acumulación de rocas a los lados de la pala, las cuales el LHD podría arrastrar hacia la calle al retirarse. Desde el punto de vista del operador, el posicionamiento no requiere precisión y, en el caso de los bordes, simplemente podría apoyarse el balde de la máquina en uno de los lados de la bóveda.

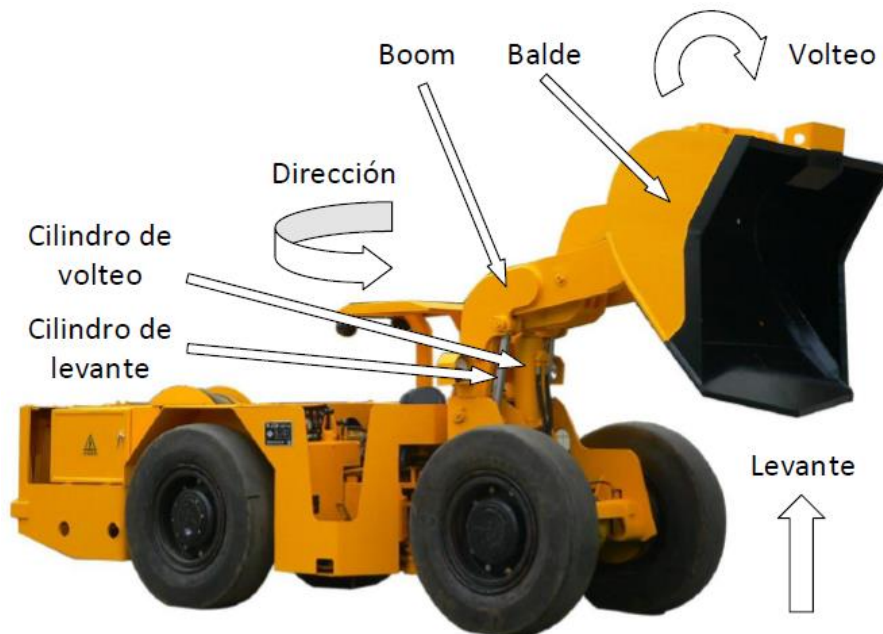


Figura 1: Esquema de componentes básicos de un LHD

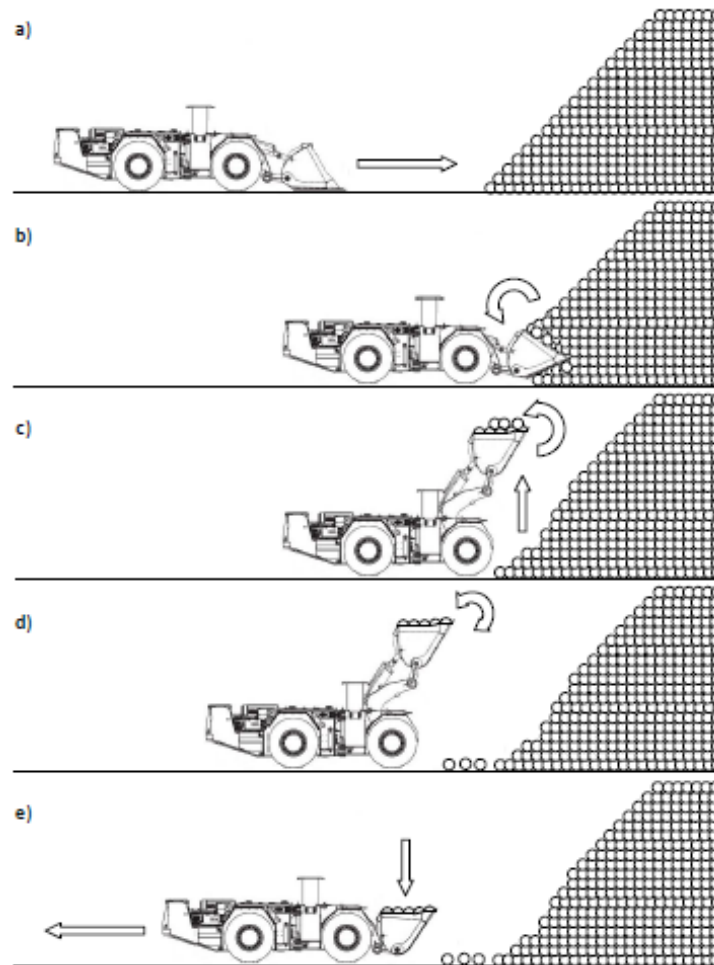


Figura 2: Etapas del carguío

Factores que dificultan la operación de carga

Una serie de condiciones, tanto relativas a la máquina, como al punto de extracción, afectan el grado de dificultad que conlleva realizar un carguío. Entre los factores que tienen relación con el LHD se encuentran el estado de las cuchillas del balde, la presión del aceite hidráulico y desgaste general del equipo de acuerdo a sus horas de servicio. Respecto de la zanja cabe destacar el contenido de humedad y granulometría del mineral, así como el estado de la carpeta de rodado. Finalmente un parámetro que no afecta directamente la carga pero si la operación es la temperatura del aceite hidráulico. Si se trabaja prolongadamente con ciclos cortos, la temperatura puede elevarse por la frecuente exigencia durante el llenado del balde, lo cual enciende una señal luminosa en el tablero. Ante esto el operador opta por realizar trayectos más largos hasta normalizar la variable.