

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES

SANTIAGO-CHILE



“DISEÑO PARA OPERACIÓN CON EQUIPOS AUTÓNOMOS
EN EXPLOTACIONES MINERAS POR HUNDIMIENTO DE
BLOQUES O PANELES”

Presentado por

FELIPE ESTEBAN REYES VALENZUELA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

ING. VÍCTOR ENCINA MONTENEGRO

Profesor co-referente

DR. RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

SANTIAGO, ENERO 2022

RESUMEN EJECUTIVO

Actualmente, en las operaciones mineras subterráneas por hundimiento de bloques y paneles, se ha intentado implementar el uso de equipos LHD y camiones autónomos adaptando los niveles diseñados para realizar las operaciones de forma manual, mediante procedimientos de segregación física y confinamiento de las operaciones autónomas, para garantizar la seguridad del personal y los equipos.

El propósito de incorporar equipos autónomos es mejorar la seguridad del personal y la productividad de la operación. Lo primero se consigue disminuyendo drásticamente las horas de exposición de personal por reducción de la dotación de operadores, pero la productividad no ha tenido las mejoras esperadas debido a las detenciones del sistema por presencia de equipos o personal de labores no autónomas o por interferencias entre las actividades de producción y desarrollo en la zona de operación.

Esta investigación propone un diseño para operación en explotaciones mineras por hundimiento de bloques o paneles, que aprovecha el máximo potencial de operación con equipos autónomos, mediante la segregación física y temporal de las operaciones unitarias llevadas a cabo con equipos autónomos de las desarrolladas con equipos con operador a bordo.

En el estudio se logra demostrar que la implementación de una segregación temporal que define un turno de 16 horas para operación exclusiva con equipos autónomos y otro de 8 horas para trabajos con equipos no autónomos, permite cumplir tanto las metas de producción como de preparación minera en una operación genérica de 40 [ktpd].

Finalmente se demuestra también, mediante una comparación de valor actualizado de costos de explotación (VAC), que el diseño y tipo de operación segregada propuesto para equipos autónomos tiene el prácticamente el mismo costo de explotación del diseño convencional para equipos con operador a bordo. La diferencia a favor del autónomo es de solo 1,8%.

ABSTRACT

Currently, in underground mining operations by Block or Panel Caving, an attempt has been made to implement the use of autonomous loaders and trucks, adapting the levels designed to carry out operations manually, through procedures of physical segregation and confinement of autonomous operations, to ensure the safety of personnel and equipment.

The purpose of incorporating autonomous equipment is to improve the safety of the personnel and the productivity of the operation. The first is achieved by drastically reducing the hours of exposure of personnel due to a reduction in the number of operators, but productivity has not reached the expected improvements because there are some system stoppages due to the presence of equipment or non-autonomous work personnel or due to interference between production and development activities in a common area of operation.

This research proposes a design for Block/Panel Caving operations, which takes advantage of the maximum potential of operation with autonomous equipment, through the physical and temporal segregation of the unit operations carried out with autonomous equipment from those developed with equipment with operator on board.

The study succeeds in showing that the implementation of a temporary segregation that defines a 16-hour shift for exclusive operation with autonomous equipment and another of 8 hours for non-autonomous equipment work, allows meeting both the production and mining preparation goals in a generic 40 [ktpd] operation.

Finally, it is also demonstrated, through a comparison of costs present value of exploitation (CPV), that the design and type of segregated operation proposed for autonomous equipment has practically the same operating cost of conventional design for equipment with an operator on board. The difference in favor of the autonomous one is only 1.8%.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres por guiarme, por entenderme, amarme y cuidarme, por su apoyo durante todos estos años de altos y bajos, y por enseñarme a perseverar y cumplir todo lo que me proponga independiente de lo cuesta arriba que se vea. Todo lo que he logrado y lograré en la vida no es más que una consecuencia de sus esfuerzos y un reflejo de sus enseñanzas.

Agradecerle a mi amor María José Jara Farías, por ser mi compañera, por el aliento que me diste todos estos años y en particular estos meses de trabajo, por la paciencia, comprensión y el cariño que me entregas día a día.

A mi profesor guía don Víctor Encina, por acompañarme durante este proceso, enseñarme y guiarme.

A mi familia y amigos

GLOSARIO

Bucle: Un bucle o *loop* en inglés, es considerado un circuito puede ser usado como circuito cerrado iterado infinitas veces.

CAPEX: El gasto en capital o *capital expenditure*, es el gasto que una compañía realiza al adquirir bienes denominados activos fijos o bien en el aumento del valor de los que ya existen.

DTA: El diámetro de tiraje aislado determina las distancias entre calles y galerías obtenidas a partir de las características del material presente.

Encoders: Dispositivo de detección que proporciona una respuesta, convierten el movimiento en una señal eléctrica que puede ser leída por algún tipo de dispositivo de control en un sistema de control de movimiento, como un *PLC*. El *encoder* envía una señal de respuesta que puede ser utilizado para determinar la posición, contar, velocidad o dirección.

INS: Un sistema de navegación inercial, es un sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, acelerómetros y giroscópicos, para calcular mediante estima la posición, orientación, y velocidad de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

LIDAR: Es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de coordenadas x, y, z.

LHD: *Load Haul Dump* o equipo de carguío de bajo perfil utilizado ampliamente en minería subterránea en construcción y producción.

OPEX: Corresponde a los costos de operación, los cuales se realizan de forma continua, son fluctuantes y pueden traducirse como gastos de funcionamiento, operativos u operacionales.

PLC: El controlador lógico programables es un equipo utilizado para la automatización de un proceso electromecánico. Se trata de una computadora que se encarga de controlar el funcionamiento de las máquinas empleadas en la producción.

SA: Se refiere a equipos semiautónomos, el cual requiere asistencia de un operador de forma remota en alguna de las etapas del proceso, como por ejemplo el carguío.

VAC: Corresponde al valor actual de los costos, es un método que permite comparar alternativas de igual vida útil, calculado a partir de la inversión inicial, los años de vida, la tasa de retorno y los costos anuales.



ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	11
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos.....	12
1.3. METODOLOGÍA	12
1.4. ALCANCES.....	12
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE HUNDIMIENTO.....	14
2.1.1. Disposición niveles del método de hundimiento.....	15
2.2. EQUIPOS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE.....	16
2.2.1. LHD.....	16
2.2.2. Camiones de Bajo Perfil.....	17
2.3. AUTOMATIZACIÓN	18
2.3.1. Niveles de automatización.....	18
2.3.2. Proveedores de sistemas de automatización.....	21
2.4. PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD DE OPERACIÓN	23
CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO	25
3.1. CRITERIOS DE PRODUCCIÓN.....	25
3.2. DIMENSIONES DEL MÓDULO DE PRODUCCIÓN	26
CAPÍTULO 4. DISEÑOS DE OPERACIÓN.....	28
4.1. DISEÑO DE OPERACIÓN CONVENCIONAL	28
4.1.1. Nivel de producción	28
4.1.2. Nivel transporte intermedio.....	29
4.1.3. Barrio cívico y taller de mantenimiento	31



4.1.4.	Dimensionamiento flota	32
4.1.5.	Operación diseño convencional.....	33
4.2.	DISEÑO DE OPERACIÓN PARA EQUIPOS AUTÓNOMOS	37
4.2.1.	Nivel de producción	37
4.2.2.	Nivel transporte intermedio.....	37
4.2.3.	Zona de transición	38
4.2.4.	Barrio cívico y taller de mantenimiento	40
4.2.5.	Dimensionamiento flota	41
4.2.6.	Operación diseño autónomo.....	42
4.3.	COMPARACIÓN OPERACIONAL ENTRE DISEÑOS.....	44
CAPÍTULO 5. SEGREGACIÓN TEMPORAL OPERACIONES.....		45
5.1.	ANÁLISIS PREPARACIÓN Y DESARROLLO EXCAVACIONES.....	45
5.2.	PROGRAMACIÓN DE EXCAVACIONES	46
CAPÍTULO 6. PLANIFICACIÓN DISEÑO AUTÓNOMO		50
6.3.	VIDA ÚTIL DE LOS MÓDULOS	50
6.4.	TIEMPOS DE EXCAVACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	51
6.5.	PLANIFICACIÓN GENERAL.....	53
6.6.	ANÁLISIS DE PLANIFICACIÓN MINERA	54
6.7.	EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA.....	56
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		61
7.1.	CONCLUSIONES	61
7.2.	RECOMENDACIONES	62
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS		63



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los modos de operación según sus ventajas y desventajas.....	20
Tabla 2. Dimensiones de módulos de producción para ambas configuraciones	26
Tabla 3. Cantidades de obra nivel de producción diseño convencional.....	29
Tabla 4. Cantidades de obra nivel de transporte intermedio diseño convencional.....	30
Tabla 5. Consideraciones iniciales dimensionamiento de flota diseño convencional.....	32
Tabla 6. Flota de equipos LHD diseño convencional	33
Tabla 7. Dimensionamiento por sector para camiones diseño convencional	33
Tabla 8. Consideraciones dimensionamiento de flota diseño autónomo.	41
Tabla 9. Dimensionamiento equipos LHD diseño autónomo	42
Tabla 10. Dimensionamiento por sector para camiones diseño autónomo	42
Tabla 11. Resumen comparativo de ambos diseños operacionalmente	44
Tabla 12. Requerimiento de preparación horizontal e incorporación de puntos de extracción por año	45
Tabla 13. Tiempos estándar de operaciones unitarias de excavación.	46
Tabla 14. Avances por año y por configuración turno de 8 [h/d].....	47
Tabla 15. Cubicación tonelaje de los módulos de operación	51
Tabla 16. Vida útil módulos diseño autónomo para alturas de columna de 230 [m]	51
Tabla 17. Tiempo de actividades de excavación para configuración 3C/3F.....	52
Tabla 18. Tiempo de construcción módulos adyacentes según número de cuadrillas	52
Tabla 19. Costos de inversión de desarrollo en [MUS\$]	57
Tabla 20. Costos de operación de construcción	58
Tabla 21. Evaluación económica de las configuraciones.....	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Metodología de trabajo	12
Ilustración 2. Vista Isométrica de los métodos de explotación bloques y paneles.....	14
Ilustración 3. Esquema principales niveles minería de hundimiento	15
Ilustración 4. Equipo LHD.....	17
Ilustración 5. Camión de bajo perfil.....	17
Ilustración 6. Configuración de elipsoides según su distribución geométrica	26
Ilustración 7. Malla tipo teniente.....	27
Ilustración 8. Dimensiones de las mallas de producción de ambos diseños.	27
Ilustración 9. Diseño nivel de producción operación convencional.....	28
Ilustración 10. Diseño del nivel de transporte intermedio operación convencional.....	29
Ilustración 11. Zona de carga de camiones operación convencional	30
Ilustración 12. Corte A-A' zona de carga.....	30
Ilustración 13. Sector norte de descarga de camiones de bajo perfil.....	31
Ilustración 14. Ubicación infraestructuras de servicios del diseño convencional	32
Ilustración 15. Operación NP por módulos donde opera un solo LHD.....	34
Ilustración 16. Sentido antihorario de transporte ejemplo carga en zona oeste	35
Ilustración 17. Sentido de transporte sectores de descarga Norte y Sur.....	36
Ilustración 18. Diseño nivel de producción operación con equipos autónomos	37
Ilustración 19. Diseño nivel de transporte intermedio operación autónoma.	38
Ilustración 20. Barreras de físicas y de confinamiento en la zona de transición.....	39
Ilustración 21. Infraestructura de servicios diseño autónomo	40
Ilustración 22. Barreras segregación física nivel de producción.....	43
Ilustración 23. Configuración de los turnos de operación con operador a bordo.....	46
Ilustración 24. Extracto programación de excavación para la configuración de tres cuadrillas y tres frentes del turno de 8 [h/d]	48
Ilustración 25. Planificación minera para la configuración de 2C, 3C/3F	54



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Avance desarrollo horizontal en función de las configuraciones.....	49
Gráfico 2. Máxima cantidad de módulos activos por año por configuración	55
Gráfico 3. Plan de producción por año para la configuración 2C, 3C/3F	56
Gráfico 4. Construcción por año para configuraciones de excavación con dos cuadrillas de construcción	59
Gráfico 5. Construcción por año para configuraciones de excavación con dos cuadrillas de construcción	60

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La minería subterránea es una de las actividades industriales más desafiantes en el mundo, por lo que desde sus inicios ha buscado promover y generar instancias de innovación, las cuales incorporan paulatinamente la automatización permitiendo procesos mineros productivos, seguros y sustentables (Competencias Mineras, 2018).

Actualmente, en la minería por hundimiento de bloques o paneles, se ha intentado implementar el uso de equipos *LHD* y camiones de bajo perfil autónomos en niveles diseñados para realizar dichas operaciones usando equipos con operador a bordo. Para ello han debido adaptar los niveles de operación mediante la incorporación de barreras y procedimientos de segregación o confinamiento físico, para evitar que ambos tipos de equipos se encuentren en algún momento en un mismo recinto.

Como resultado de la práctica de adaptar los diseños se observan distintos problemas como detenciones del sistema por presencia de elementos extraños en la ruta, por ejemplo, fragmentos de roca caídos desde los equipos, o por necesidad de tener personal presente en labores de supervisión, muestreo o de apoyo operacional. También hay casos de interferencias operacionales causadas por la coexistencia de actividades con equipos no autónomos, como los de desarrollo, en la zona de producción.

Si bien, la seguridad y productividad pueden beneficiarse a través de la incorporación de equipos autónomos, al realizar las tareas de trabajo repetitivas sin un operador (Marshall et al., 2016), el mero uso de estos, no asegura la obtención de dichas mejoras, debido a que los niveles de operación en los cuales se implementan, no fueron diseñados para su óptima utilización, reconociendo además que las interacciones entre máquinas autónomas y no autónomas son difíciles de compatibilizar, poniendo a veces, en riesgo la seguridad de los trabajadores (Heath, 2018).

Esta investigación busca eliminar los problemas de coexistencia de operaciones con equipos autónomos y no autónomos en minería por hundimiento, mediante la segregación temporal, lo cual además permitirá sacar el máximo provecho de las tecnologías autónomas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Proponer un diseño de operación de extracción y transporte intermedio para explotaciones mineras por hundimiento de bloques o paneles que aproveche el máximo potencial de la operación con equipos autónomos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Definir los criterios de segregación física y temporal de la operación con equipos autónomos.
- Diseñar la disposición general de niveles de extracción y transporte intermedio ajustado a los criterios definidos.
- Verificar el cumplimiento del plan de producción, preparación de labores mineras y compatibilidad de operaciones con segregación temporal.

1.3. METODOLOGÍA

El presente trabajo sigue el siguiente esquema de trabajo (Ilustración 1)



Ilustración 1. Metodología de trabajo

1.4. ALCANCES

- El presente trabajo es un estudio de selección en que se comparan los aspectos diferenciadores de 2 alternativas de diseño, para los niveles de extracción y transporte intermedio de una explotación genérica por hundimiento de bloques o paneles.
- El estudio compara diseños de niveles de producción (*NP*), transporte intermedio (*NTI*) e infraestructura de servicio como los talleres de mantención y el barrio cívico.
- No se aborda el diseño de los niveles de ventilación ni de hundimiento (*NH*)



- Se contrastarán el diseño convencional adaptado para equipos autónomos, y el diseño especial para la operación con equipos autónomos.
- La comparación comprende las fases de construcción de niveles y de producción.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE HUNDIMIENTO

La minería subterránea ha sido una alternativa creciente a lo largo de los años principalmente para explotar yacimientos de bajas leyes localizados a grandes profundidades, en que las explotaciones a cielo abierto dejan de ser rentables.

Dentro de los métodos subterráneos masivos se tiene las explotaciones subterráneas por hundimiento (Ilustración 2), que se basan en técnicas gravitacionales de arranque, las cuales, en conjunto a los esfuerzos internos de la roca, logran que el macizo rocoso se fragmente generando un material granular tamaño adecuado para ser extraído y trasladado a la planta de tratamiento.

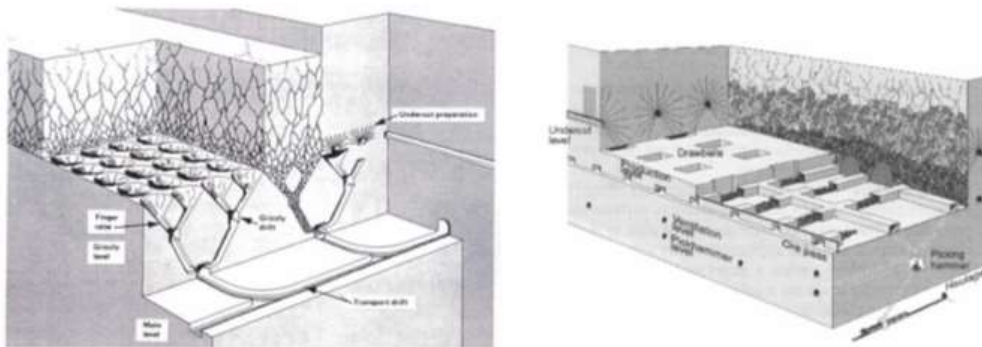


Ilustración 2. Vista Isométrica de los métodos de explotación bloques y paneles

Este método de explotación presenta el menor costo de extracción en el campo de la minería subterránea. Debido a que requiere de una menor cantidad de desarrollo por tonelada extraída y que utiliza la acción de la gravedad principalmente para movilizar el mineral, reduciendo así significativamente los costos operacionales (Vergara, 2015). El método de hundimiento de bloques es utilizado cuando se presentan cuerpos masivos con bajas leyes y mala calidad del macizo rocoso (Abzalov, 2016). Por lo que, este tipo de explotación se desarrolla típicamente en yacimientos tipo pórfido, con una distribución de ley diseminada y que presentan una facilidad para su fracturamiento por hundimiento. El hundimiento se lleva a cabo mediante cortes basales de un bloque o panel, removiendo el punto de apoyo de la roca haciendo que esta se desplome debido a la inducción de esfuerzos internos y al efecto de la gravedad (Darling, 2011).

2.1.1. Disposición niveles del método de hundimiento

Las minas de hundimiento por bloques o paneles se conforman de una serie de niveles operativos los cuales permiten la extracción del mineral aprovechando el efecto de la gravedad. A continuación, se muestran y definen los principales niveles de estos métodos (Ilustración 3)

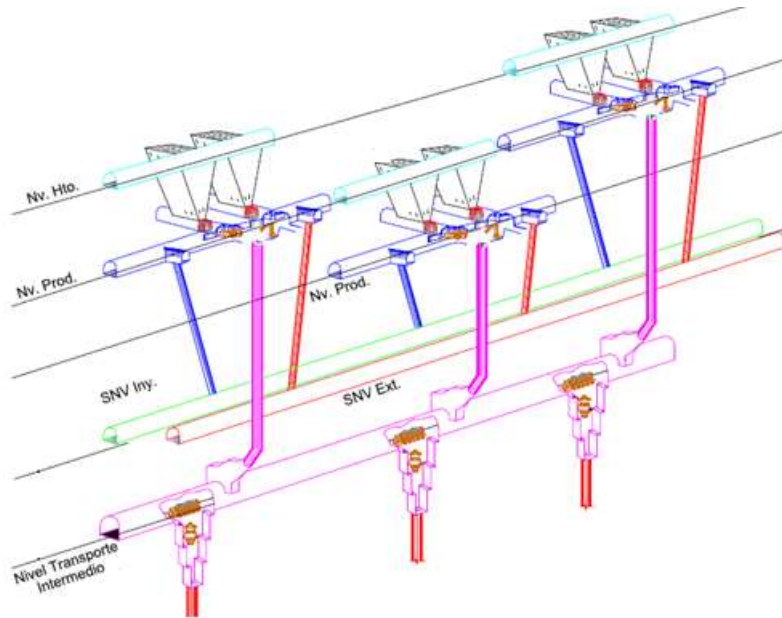


Ilustración 3. Esquema principales niveles minería de hundimiento

- **Nivel de hundimiento (NH):** Corresponde a un conjunto de galerías horizontales que permiten generar el fracturamiento de la roca a través de perforación y tronadura ubicados en el nivel más alto del *layout* minero, aquí se realizan todas las actividades para generar el corte basal para lograr la socavación de la roca.
- **Nivel de Producción (NP):** Está ubicado bajo el nivel de hundimiento *NH*, conformado por una serie de galerías denominadas calles y zanjas, las cuales se pueden distribuir de diferentes maneras según la configuración de extracción que se diseñe. En el NP se realizan los desarrollos de preparación minera, excavación de bateas, obras civiles y montaje de líneas de servicios. El nivel de producción se conecta con el NH a través de las bateas a través de las cuales se traspa el mineral fracturado para ser extraído de los puntos de extracción y llevado a las estaciones de traspaso. Es el nivel que presenta la mayor cantidad de desarrollos y fortificación, debido a la gran cantidad de esfuerzos a los que son sometidas sus infraestructuras, la alta duración que se requiere de ellas y el trabajo que se realiza en ellas.



- **Nivel de Transporte Intermedio (NTI):** Comprende los desarrollos, montajes y obras civiles que permiten el manejo del mineral al exterior mina mediante camiones, correas transportadoras, trenes o alguna combinación de ellos. En este nivel se carga el mineral proveniente del nivel de producción, a un sistema de manejo de materiales que lo conduce a la planta de chancado.
- **Subnivel de ventilación (NVI y NVE):** Conjunto de desarrollos horizontales y verticales que tienen como fin proporcionar ventilación a los demás niveles de la operación a través de la inyección de aire fresco por medio del subnivel de ventilación de inyección (NVI) y extraer el aire contaminado o viciado mediante el subnivel de ventilación de extracción (NVE).
- **Barrio cívico:** Sector administrativo de la mina donde los trabajadores tienen libre tránsito, en donde no circulan maquinarias pesadas ni vehículos, y que generalmente contiene oficinas, comedores, baños, vestidores, entre otros.
- **Taller de mantención:** Al igual que el barrio cívico, se ubica en los niveles de transporte y de producción, el taller esta adecuado según el tipo de maquinaria que atenderá. Aquí se atiende las necesidades de mantenciones mecánicas, eléctricas e hidráulicas de los equipos y se llevan a cabo reparaciones menores o cambio de componentes de equipos.

2.2. EQUIPOS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE

Existen diferentes maneras de realizar el carguío y transporte del mineral en minería subterránea, los que en base a constantes avances tecnológicos buscan realizar de la forma más productiva, segura y económica la extracción del mineral. En esta línea, una de las configuraciones más utilizadas en la minería de hundimiento es la combinación LHD y camiones de bajo perfil, debido a: la flexibilidad, rendimiento y capacidad.

2.2.1. LHD

Los equipos *LHD* (Ilustración 4), corresponden a cargadores frontales de bajo perfil utilizados para cargar y transportar mineral desde los puntos de extracción a los puntos de vaciado, o directamente sobre camiones (Saayman, 2006).



Ilustración 4. Equipo LHD

La flexibilidad, movilidad, y versatilidad de estas unidades han dado a la industria una herramienta útil para el desarrollo y producción mineras. Muchas minas antiguas fueron rediseñadas para acomodarse al uso de estos equipos.

Los equipos LHD son vehículos de 4 ruedas, que constan de dos partes conectadas por una articulación central accionada hidráulicamente, entregando un alto nivel de maniobrabilidad en galerías de minas estrechas. La parte trasera de la máquina contiene el motor y la parte delantera el balde. Este último, la dirección y los frenos se operan hidráulicamente (Larsson, 2007). Suelen tener entre 8 y 15 [m] de largo, pesan de 20 a 75 [t] y funcionan con energía eléctrica o diésel. Por lo general estos equipos operan a una velocidad relativamente bajas de unos 10 a 30 [km/h] (Gustafson, 2011).

2.2.2. Camiones de Bajo Perfil

Los camiones de bajo perfil o *dumper* en inglés (Ilustración 5), son ampliamente utilizados como el principal vehículo de transporte sin rieles subterráneo. Los camiones mineros de bajo perfil se cargan en buzones/piques de traspaso o directamente con el balde de LHD para trasladar el producto hasta el chancador primario.



Ilustración 5. Camión de bajo perfil

Estos vehículos funcionan mediante energía eléctrica o diésel y presentan ventajas como: movilidad, flexibilidad, alta eficiencia, gran capacidad, y es uno de los sistemas más económicos en términos de desarrollos subterráneos (Li & Zhan, 2018).

Actualmente los camiones de bajo perfil diésel son los más comunes y tradicionalmente utilizados, varían entre los 15 y 50 [t], con velocidades medias de 25 [Km/h], capaces de girar en radios de curvatura pequeños y transitar por fuertes pendientes.

2.3. AUTOMATIZACIÓN

2.3.1. Niveles de automatización

La automatización no es un concepto absoluto y es mejor entenderlo como una serie de niveles continuos, que a medida que avanzan dan mayor nivel de autonomía al proceso. Cada nivel implica un aumento en los niveles de automatización de la operación y una disminución de la intervención humana, siendo estos niveles definidos a partir de una combinación de inteligencia e independencia que presenta el equipo. Los distintos grados de automatización se clasifican como sigue: (McCarthy, 2009):

- **Control directo:** El personal humano posee control total o parcial del equipo.
- **Tele comandada:** La operación es realizada totalmente por intervención humana pero los operadores están localizados en un centro de control remoto a la faena,
- **Supervisado:** El operador del equipo no comanda directamente las acciones del equipo, sino que lo hace a través de un sistema digital con computadores programables locales. Esto puede ser a bordo o por comando remoto.
- **Automático:** El equipo lleva a cabo procesos fijos predefinidos por el fabricante o el operador, sin intervención de este durante la ejecución del proceso.
- **Autónomo:** El equipo lleva a cabo procesos automáticos y puede adaptarse y tomar decisiones sin intervención humana durante el proceso.

En las operaciones mineras, los equipos se clasifican en base a la manera en que realizan su operación, distinguiéndose los siguiente grados de automatización descritos por (Gustafson, 2011):

- **Manual:** Un operador está a cargo de controlar el equipo en todas sus funciones y durante todo el ciclo de trabajo, estando presente dentro del equipo en todo momento Esta es una categoría de nivel bajo de automatización.



- **Control remoto con línea de visión:** El operador conduce el vehículo manualmente hasta donde corresponda, posteriormente se desmonta para conducirlo hacia el su destino por radio control remoto, observando la operación que realiza. Esta también es una categoría de nivel bajo de automatización.
- **Tele comandada:** La operación del equipo está a cargo por completo del operador, pero este opera desde una sala de control sin visión directa sobre el equipo, generalmente asistido por sistemas de circuito cerrado de TV. Este tipo de operación pertenece al nivel medio de automatización.
- **Semiautónoma/Tele asistida:** Es una combinación de la anterior y siguiente, con un control donde una parte del proceso la realiza un operador de forma tele comandada y otra se lleva a cabo de manera autónoma. Por esta dualidad se considera de un nivel medio de automatización
- **Autónoma:** Toda la operación es realizada por medio de software y hardware, sin la necesidad de la intervención directa de un ser humano. Por lo que tiene un nivel de automatización completa.

En la Tabla 1 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de los modos de operación descritos anteriormente:



Tabla 1. Comparación de los modos de operación según sus ventajas y desventajas

Modo de operación	Ventajas	Desventajas
Manual	Baja inversión inicial Alta percepción sensorial (Roberts et al., 2000)	Baja seguridad Fatiga Errores humanos (Vega, 2020)
Control remoto	Paso intermedio para mejora automatización	Lentitud Improductividad Inseguro
Tele comandada	Alta Seguridad y Comodidad	Solo permite operar un equipo a la vez Dificultad de maniobras Diminución de productividad y velocidad Altos costos de inversión (Dragt et al., 2005)
Autónoma	Alta productividad Más cantidad de equipos controlables al mismo tiempo Alta utilización de equipos	Problemas de aplicación en la realidad Aumento tiempo de ciclos Dificultad de programación (Parreira et al., 2009)
Semiautónoma	Operación de más de un equipo a la vez Seguridad	Baja productividad (Uribe Neira, 2014)

2.3.2. Proveedores de sistemas de automatización

En la actualidad, existen tres sistemas que dan solución a la automatización de equipos en minería subterránea, estos son comercializados las compañías Sandvik, Caterpillar y Epiroc.

AutoMine (Sandvik)

Es un sistema de automatización para operación autónoma y tele remota para una amplia gama de equipos subterráneos de Sandvik y que además es adaptable a otras marcas.

Este sistema de automatización está diseñado para realizar de forma autónoma la carga y traslado del material, mediante el sistema de navegación absoluta para realizar los desplazamientos al interior de la mina. El paquete *AutoMine* se puede implementar tanto en camiones como a equipos cargadores *LHD*, y una de las principales ventajas que ofrece a los operadores es que pueden realizar la operación desde una sala de control y simultáneamente monitorear la flota de cargadores *LHD* o camiones que trabajan a kilómetros de distancia sin la necesidad de un operador a bordo. Este sistema además cuenta con funciones de autoaprendizaje que permite abordar singularidades presentes en el camino y generar alertas a la flota para evitar y/o restringir movimientos buscando evitar fallas o detenciones del sistema.

AutoMine está compuesto por 3 subsistemas cuya función particular es:

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

Minegem (CAT)

Por otro lado, tenemos la solución de automatización de CAT denominado *Minegem*, desarrollado a partir de la necesidad de reducir la exposición humana a las lesiones, el sistema aleja al operador de situaciones peligrosas y les permite trabajar en un entorno más cómodo y ergonómico. Utilizando tecnología para automatizar y mejorar las operaciones. Este sistema ofrece 2 niveles de control:

- Copiloto: dirección automática asistida por el operador
- Piloto automático: la máquina funciona por sí sola con sistema de autoguiado

A diferencia de la solución propuesta por Sandvik, *Minegem* utiliza un sistema basado en la navegación reactiva y localización oportuna, la cual en base a sensores reacciona al entorno decidiendo como responder. Los sensores utilizados son un sistema de navegación inercial (*INS*), odometría y articulación central (*encoders*) y dos láseres (*LIDAR*) ubicados en la parte delantera y trasera del vehículo (Rivera & Renato, 2014), que se encargan de escanear perfiles y compararlos con los perfiles existentes creados a partir del diseño de la mina. Los láseres son utilizados para decidir y dar órdenes en función del estado del entorno como: moverse hacia delante, hacia atrás, mantener la misma velocidad, acelerar o frenar.

Cabe destacar que, 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 debe estar acoplado a un mapa topológico con información acerca de los puntos de carga, vaciado, intersecciones y otros marcadores puntos singulares que son utilizados en un esquema de localización oportunista.

Scooptram Automation System (Epiroc)

El software utilizado por la compañía Epiroc corresponde al *scooptram automation system*, este sistema hace uso de un paradigma híbrido de navegación basándose en los dos sistemas anteriores comunicándose en forma inalámbrica mediante *WLAN*. Un conjunto de comportamientos y situaciones problemáticas 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 es híbrido, donde el mapa topológico global almacena como nodos todas las intersecciones, puntos de carga, vaciado y otros puntos de interés. 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* (Tampier Cotoras, 2018)

El sistema utiliza cámaras en parte frontal, posterior e interior de cabina, además de incorporar los siguientes sensores al equipo:

- Dos torres con láser.
- Dos antenas.
- Unidad de medida inercial.
- Odómetro, sensores inductivos y de ángulo de desvío.

2.4. PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD DE OPERACIÓN

La utilización de equipos autónomos generalmente se refiere a equipos *LHD* y camiones de bajo perfil que se introducen a operaciones cuyos diseños se hicieron pensando en realizar la operación de forma manual. Esto genera problemas de compatibilidad entre las operaciones autónomas y manuales que no se pueden automatizar, como las de excavación y construcción necesarias en el proceso de preparación de nueva área de producción.

Las interacciones entre máquinas autónomas y no autónomas son difíciles de compatibilizar, debido a que para llevar a cabo una operación segura se requieren un conocimiento y un control precisos de las operaciones (Heath, 2018), entonces cualquier error puede provocar accidentes e interferencias como detenciones del sistema ocasionadas por: presencia de elementos extraños en la ruta o presencia de equipos manuales en la zona autónoma, horarios inhabilitados para circulación durante las operaciones de tronadura, rocas caídas desde los equipos o presencia de personal de faena o de visita, entre otras.

Si bien, la seguridad y productividad teóricamente pueden beneficiarse aumentando la autonomía en las tareas de trabajo repetitivas, o que se pueden realizar sin un operador mediante equipos autónomo (Uribe Neira, 2014), mientras no se resuelvan los problemas de compatibilidad, no se podrán obtener los beneficios asociados a la automatización, puesto que, todos ellos se anulan por las interferencias y frecuente necesidad de reiniciar los sistemas automáticos (Hartman & Mutmansky, 2002). También se debe considerar en el rediseño de la operación, que las operaciones tele comandadas y autónomas requieren de una serie de nuevas infraestructuras, redes y protocolos de trabajo que no necesariamente son replicables en las zonas de preparación y extracción tradicionales (Salvador, 2020), es por esto que es necesario aumentar la confiabilidad de los sistemas automatizados, haciendo esfuerzos para



hacer que el entorno de la mina sea lo más amigable posible para la operación con equipos autónomos, además de diseñar la mina especialmente para uso de esta tecnología en la operación (Paraszczak et al., 2015) (Ghodrati et al., 2015).

A raíz de ello (Fishwick & Telias, 2014) (Castro, 2014) comentan que “la experiencia adquirida en las aplicaciones industriales indica que para obtener los mismos resultados operacionales que las operaciones manuales, no basta simplemente reemplazar con equipos autónomos”, más bien se requiere de un rediseño del proceso de extracción. Es de vital importancia para la implementación de la tecnología autónoma y su desarrollo la organización de los procesos, maximizar la productividad en el tiempo que sólo operan equipos y maquinarias, eliminando la organización de la actividad por turnos y configurando zonas de operación de equipos y maquinaria automatizadas, y zonas de operación de aquellas actividades que no se puedan automatizar (Pérez et al, s.f) (Gustafson et al., 2013).

CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO

A continuación, se presentan los criterios que de diseño para la operación convencional y para operación con equipos autónomos. Para ser lo más general y aplicables a la realidad estos criterios consideran una serie de condiciones iniciales comunes para ambos a fin de hacerlos comparables.

3.1. CRITERIOS DE PRODUCCIÓN

La producción considera una operación de 40.000 [t/d], que se realiza mediante equipos *LHD* ubicados en el nivel de producción con capacidades de carga entre 7,6 - 8,4 [m³]. Estos descargan el mineral directamente a camiones de bajo perfil los cuales son compatibles con los equipos *LHD* y se encuentran ubicados en el nivel de transporte intermedio.

Las operaciones consideran, para el diseño convencional operación con equipos con operador a bordo en todas las actividades mineras de producción, excavación y construcción y en el diseño para equipos autónomos se considera la producción con operación autónoma, y la excavación y construcción con operador a bordo.

Dentro de las consideraciones que se toman para elaborar los diseños de ambas operaciones se destacan las siguientes:

- El polígono de explotación comprende 20 calles en dirección este-oeste y 20 zanjas en dirección norte-sur.
- En ambos diseños operan equipos *LHD* y camiones de las mismas capacidades, pero en el caso del diseño convencional la operación se realiza con operador a bordo y para el diseño autónomo de forma autónoma.
- Los niveles de producción y transporte intermedio poseen las mismas dimensiones y forma.
- Ambas operaciones son realizadas con carga directa de mineral desde el *LHD* al camión, es decir, estos diseños no poseen puntos de vaciado ni piques al interior del polígono de producción.
- Las zonas de carga de los camiones se ubican en las cabeceras este y oeste del nivel de producción.
- El diseño de ambas operaciones posee frontones de acopio de mineral, en los cuales los equipos *LHD* pueden descargar el mineral si no tiene camión disponible y luego pueden hacer doble manejo cuando llegue el camión.
- Tanto el barrio cívico como el taller de mantención son ubicados en la zona norte del polígono y en la cota del nivel de producción

3.2. DIMENSIONES DEL MÓDULO DE PRODUCCIÓN

Existen diferentes tipos de configuraciones para la disposición de puntos de extracción los cuales reciben su nombre en base a la geometría en la que se distribuyen espacialmente. Los tipos de configuraciones geométricas básicas existentes corresponden a la configuración cuadrangular, triangular y mixta (Ilustración 6), siendo esta última una combinación de la configuración cuadrangular y triangular.

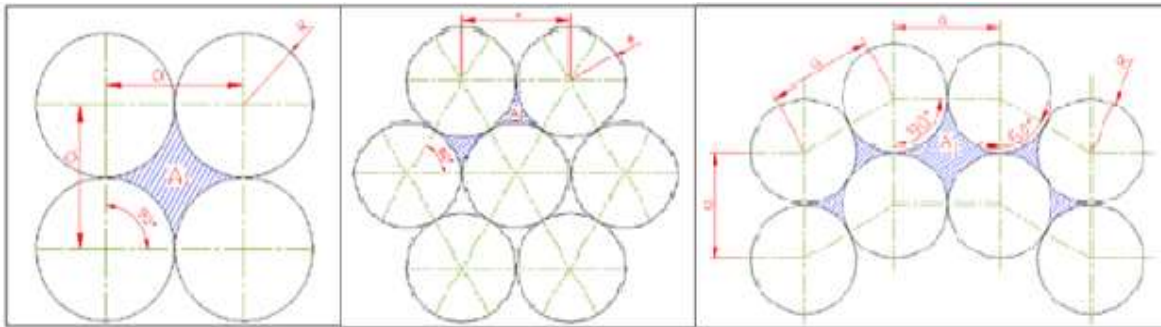


Ilustración 6. Configuración de elipsoides según su distribución geométrica

En este estudio, para los diseños de ambas tecnologías se usa la configuración tipo Teniente (Ilustración 7) la cual es ampliamente utilizada en minas explotadas por método de hundimiento y queda con las dimensiones indicadas en Tabla 2, tal como se presenta en la Ilustración 8:

Tabla 2. Dimensiones de módulos de producción para ambas configuraciones

	Malla de producción convencional	Malla de producción autónoma
Tipo de malla	Teniente	Teniente
R [m]	8	8
Dcc [m]	27,7	27,7
Dzc	16	16
Dzz	13,9	13,9
a = Ancho galería [m]	4,5	4,5
Sustentación [%]	55%	55%

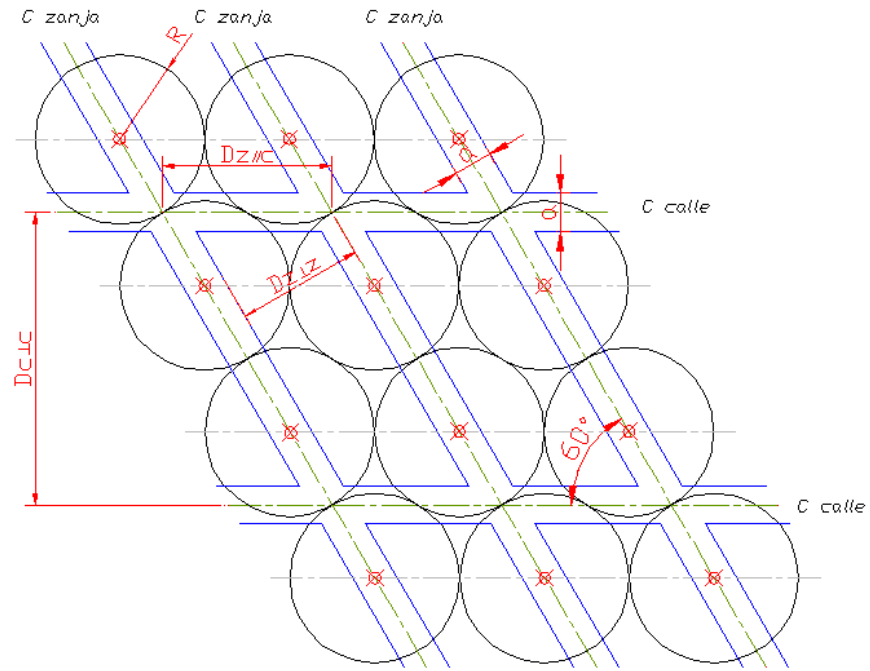


Ilustración 7. Malla tipo teniente

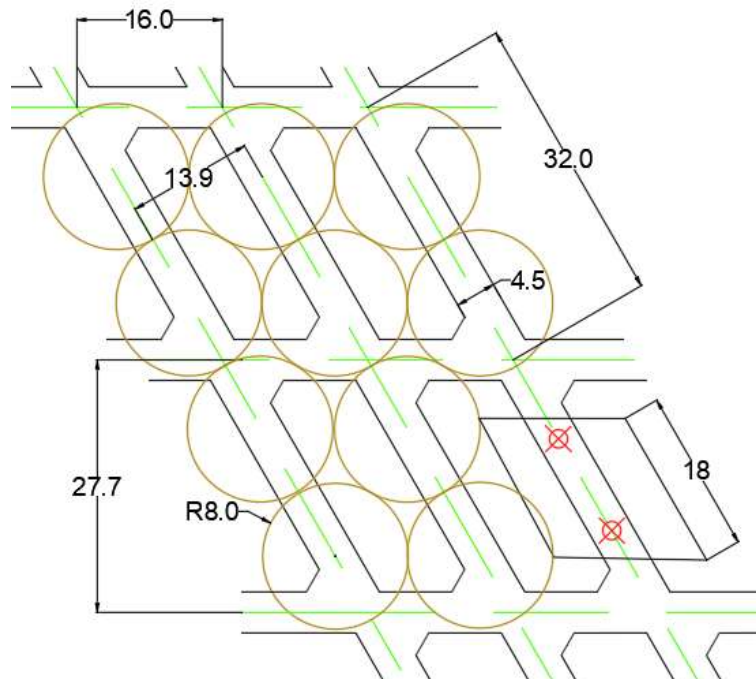


Ilustración 8. Dimensiones de las mallas de producción de ambos diseños.

CAPÍTULO 4. DISEÑOS DE OPERACIÓN

Para los efectos de este trabajo, se considera que las dimensiones de todas las galerías por donde circulan equipos LHD son de 4,5 x 4,1 [m] ya sea que sean cabeceras o parte de los módulos de producción o barrios cívicos o talleres de mantención de cada alternativa. De la isma manera, se consideran dimensiones de 5 x 5,6 [m] en todas las galerías por donde circulen camiones.

4.1. DISEÑO DE OPERACIÓN CONVENCIONAL

4.1.1. Nivel de producción

La configuración del nivel de producción se presenta a continuación (Ilustración 9).

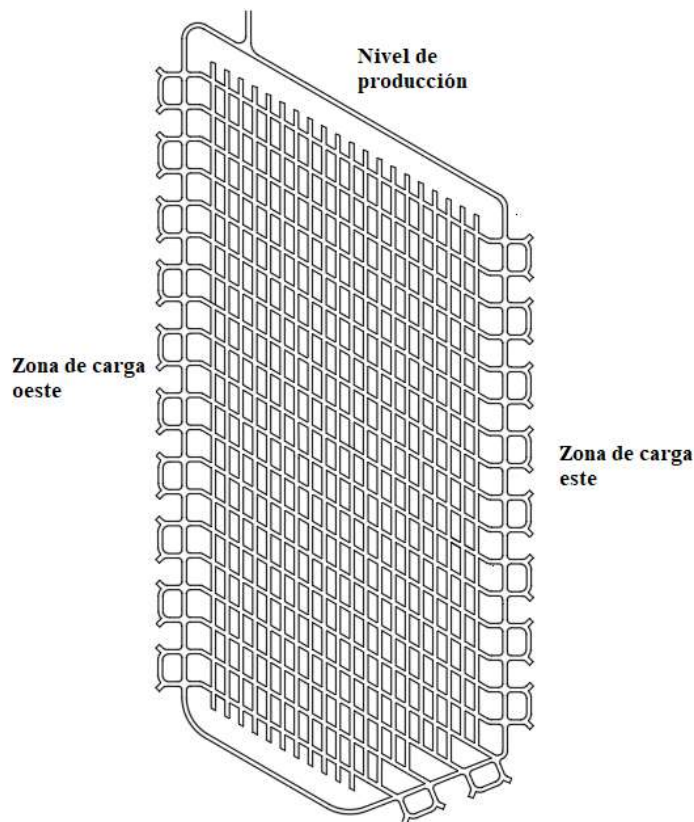


Ilustración 9. Diseño nivel de producción operación convencional

Donde, se destaca la existencia de un eje longitudinal (Norte-Sur) de simetría que separa 2 zonas para la extracción con equipos *LHD*, la zona oeste y la zona este del diseño. En cada zona se pueden distinguir módulos de extracción compuestos por dos mitades de calles contiguas, las cuales se conectan a una descarga un punto común de transferencia al camión. A continuación, se pueden apreciar las cantidades de obra del nivel de producción (Tabla 3).

Tabla 3. Cantidades de obra nivel de producción diseño convencional

Cantidades de obra NP	valores
Cabecera Norte [m]	382
Cabecera Sur [m]	226
Cabecera este [m]	693
Cabecera oeste [m]	657
Largo calle completa [m]	336
Largo galería zanja [m]	32
Distancia zona de carga [m]	45
Largo frontón de acopio [m]	10
Distancia lineal total NP [m]	23.214

4.1.2. Nivel transporte intermedio

Por su parte, el nivel de transporte intermedio (Ilustración 10) se construye a partir de las zonas de carga de camiones localizadas en las cabeceras este y oeste del nivel de producción, uniando ambos niveles en la zona de carga. Este nivel se ubica justo por debajo del nivel de producción, específicamente bajo el piso de sus galerías (Ilustración 11 y Ilustración 12).

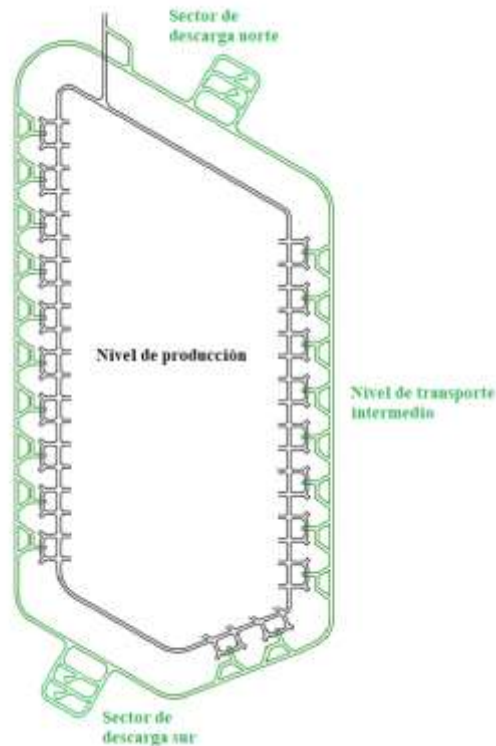


Ilustración 10. Diseño del nivel de transporte intermedio operación convencional

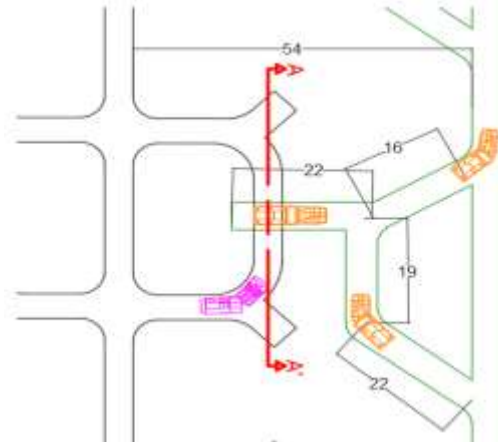


Ilustración 11. Zona de carga de camiones operación convencional

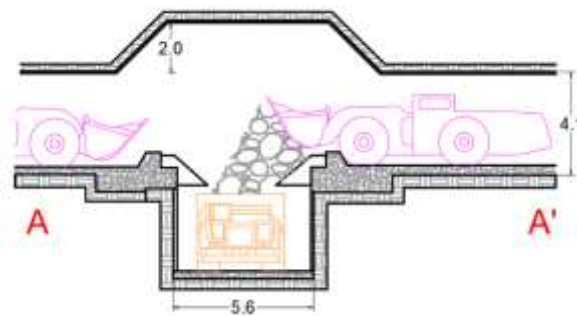


Ilustración 12. Corte A-A' zona de carga.

En cuanto a las cantidades de obra del nivel de transporte intermedio, estas se pueden apreciar en la (Tabla 4).

Tabla 4. Cantidades de obra nivel de transporte intermedio diseño convencional

Cantidades de obra NTI	[m]
Cabecera Norte	556
Cabecera Sur	287
Cabecera Este	807
Cabecera Oeste	696
Dist. lineal sector de carga	79
Dist. lineales sectores de descarga	734
Distancia lineal total NTI	4.660

El diseño cuenta con dos sectores de descarga de mineral ubicados en la zona norte y sur del polígono, los que a su vez poseen dos piques de traspaso respectivamente (Ilustración 13), a estos sectores se hace ingreso mediante el bucle de transporte en sentido antihorario, por medio del cual los camiones

descargan el mineral en la zona Norte o Sur según la zona en la que son cargados. Los cargados al Este descargan en piques del Sur y los cargados al Oeste descargan en piques del Norte.

La zona de descarga de camiones (Ilustración 13), posee dimensiones de 83 y 67 [m], siendo estas dimensiones iguales para los sectores de descarga Norte y Sur. Cabe destacar además que las dimensiones del cruzado de descarga admiten camiones de hasta 16 [m].

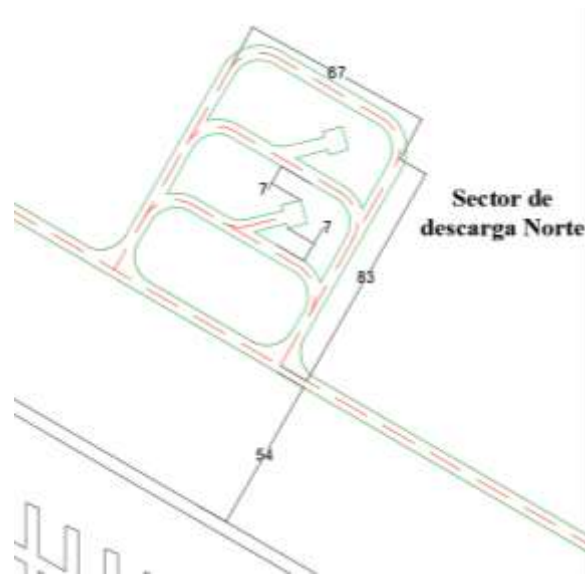


Ilustración 13. Sector norte de descarga de camiones de bajo perfil

4.1.3. Barrio cívico y taller de mantenimiento

Las infraestructuras de servicios se ubican en la zona norte del diseño (Ilustración 14). Debido a la cercanía que existe entre los niveles de producción y transporte intermedio, ambas infraestructuras se emplazan en la misma cota del nivel de producción, asimismo las infraestructuras de servicios que habitualmente se instalan tanto en el nivel de producción y el nivel de transporte intermedio, en este caso hay un solo gran barrio cívico con la infraestructura y comodidades necesarias para albergar a los trabajadores de ambos niveles y de igual forma, un solo gran taller de mantenimiento, que posee la infraestructura y requerimientos necesarios para dar mantenimiento a los equipos *LHD*, camiones de bajo perfil y equipos de desarrollo de la mina..

Otros aspectos del diseño importantes son el acceso al taller de mantenimiento, que se realiza por la zona norte del nivel de transporte intermedio al igual que lo hacen los *LHD* en el nivel de producción, por lo que se construye un puente tipo loza en aquellos lugares que se cruzan los niveles.

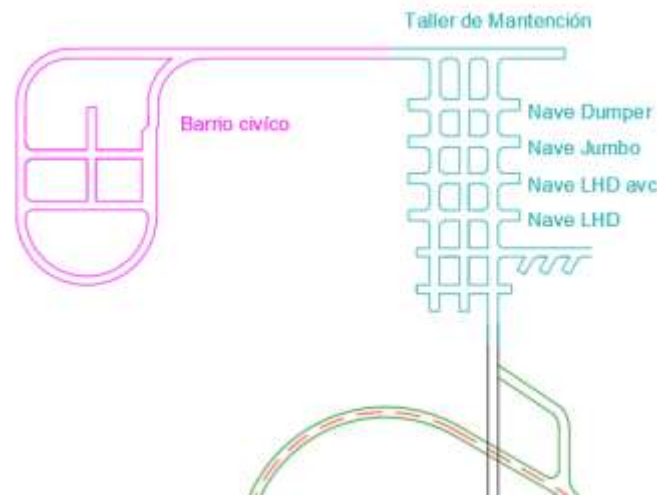


Ilustración 14. Ubicación infraestructuras de servicios del diseño convencional

El ancho de las galerías de acceso al taller de mantenimiento es igual que el ancho de galería para el equipo más grande que podría entrar a mantenimiento, por lo que el acceso principal a la infraestructura desde los niveles de producción y transporte tienen dimensiones de 5 x 5,6 [m]. Además, las naves de mantenimiento de los equipos se configuran en base a las longitudes de los equipos que las usan.

4.1.4. Dimensionamiento flota

El dimensionamiento de la flota del diseño convencional considera el uso de equipos operados de forma manual, con la descarga directa desde el *LHD* a los camiones de bajo perfil con los datos de la (Tabla 5).

Tabla 5. Consideraciones iniciales dimensionamiento de flota diseño convencional

Datos para dimensionamiento de flota	
Producción diaria [t/d]	40000
Capacidad <i>LHD</i> [m ³]	8,4
Capacidad camiones [m ³]	30
Densidad [t/m ³]	2,6
Relación de vacíos	0,5
Factor de llenado [%]	85%
Disponibilidad física [%]	80%
Utilización [%]	75%
Numero de turnos [un]	3
Horas de trabajo efectivo [h/d]	12

El dimensionamiento de la flota se realiza para la condición más demandante del diseño, es decir, para las distancias recorridas más largas por los equipos. Para esta operación la condición más demandante de los diseños corresponde en el caso del lado Oeste al módulo de operación 1 y 2 correspondiente a las estaciones de carga ubicadas al norte del diseño, y por el sector Este, corresponde al módulo de operación 19 y 20 correspondientes a las estaciones de carga ubicadas al sur del diseño.

A partir de esto, se obtiene el número de ciclos de los equipos, el tiempo que tardan en recorrer las distancias de operación, el tiempo de cargar, descargar y maniobrar los equipos, y los rendimientos de estos, para en función de ellos calcular el número de equipos necesarios para satisfacer la producción diaria requerida en caso más desfavorable. La flota necesaria de equipos *LHD* resulta ser de 10 [un] (Tabla 6) con 9 [un] camiones (Tabla 7).

Tabla 6. Flota de equipos LHD diseño convencional

Equipos <i>LHD</i>	
Capacidad [t]	12,4
Rendimiento <i>LHD</i> [t/h]	332
Rendimiento diario [t/d]	3.985
Numero de equipos <i>LHD</i> [un]	11

Tabla 7. Dimensionamiento por sector para camiones diseño convencional

Dimensionamiento Camiones		
	Transporte Lado W	Transporte Lado E
Capacidad [t]	44,2	44,2
Número de baldadas [un]	3	3
Carga efectiva camión [t]	37,2	37,2
Rendimiento Camión [t/h]	185	185
Rendimiento diario [t/d]	2.222	2.222
Número de camiones [un]	10	

4.1.5. Operación diseño convencional

La operación en el diseño convencional es realizada de forma manual en cada una de las actividades que se realizan en la mina, como lo son el carguío y transporte, y las operaciones de desarrollo de labores mineras como excavación y construcción de túneles. A continuación, se detalla el modelo de operaciones en este diseño.

Módulos de producción

En el caso del nivel de producción del diseño convencional, la operación se realiza mediante equipos *LHD* operados de forma manual. Cada uno de estos equipos trabaja en unidades de explotación unitaria denominadas “módulos de operación” (Ilustración 15), los cuales comprenden dos medias calles con la misma cantidad de puntos de extracción. De esta forma se reparte la misma cantidad de mineral en la zona Oeste y Este. La operación se realiza en 3 turnos de 4 horas efectivas cada uno, teniendo una producción global efectiva de 12 [h/d].

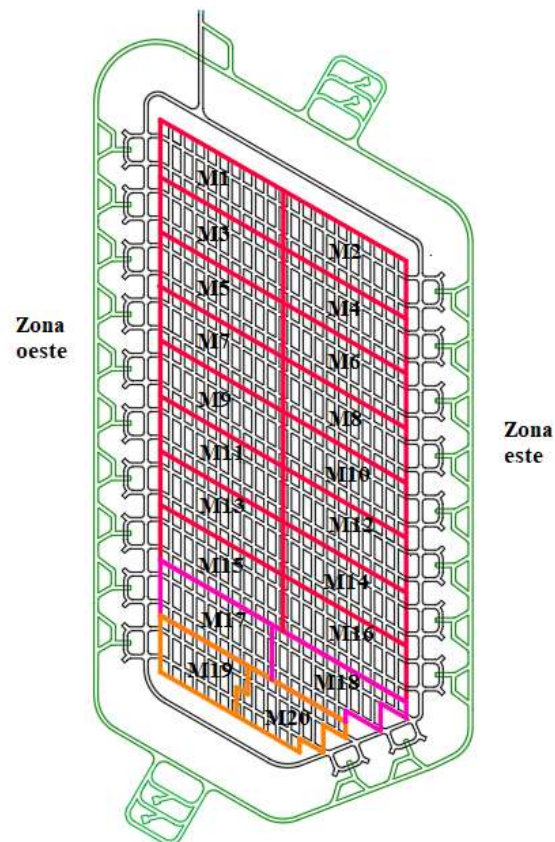


Ilustración 15. Operación NP por módulos donde opera un solo LHD

Cada módulo de operación cuenta con dos frontones de acopio con un largo de 7,2 [m], suficiente para poder acumular las baldadas requeridas por los camiones.

Nivel de transporte intermedio convencional

El nivel de transporte intermedio, parte su operación con la carga de los camiones manuales en los sectores de carga. Los equipos *LHD* cargan de forma manual el mineral en los camiones, y estos lo transportan a los piques de descarga ubicados en el sector norte y sur del diseño.

El transporte del mineral a través del nivel se realiza mediante un *bucle* unidireccional en sentido antihorario (Ilustración 16), que recorre todo el nivel de transporte intermedio incluyendo las estaciones de descarga.

Los camiones en primer lugar entran aculados al sector de carga, una vez que son cargados por los *LHD*, reingresan a la cabecera principal del nivel de transporte incorporándose al *bucle*, por donde se dirigen a la estación de descarga más próxima, si se cargan en el sector Oeste los camiones deben descargar en los piques del Sur y en caso contrario, los camiones deben descargar en los piques del Norte. Ambas descargas se realizan de forma aculada.

Finalmente, una vez efectuada la descarga del camión, este realiza su recorrido al sector contrario en el cual fue cargado en primera instancia y repetir el ciclo por las zonas contrarias.

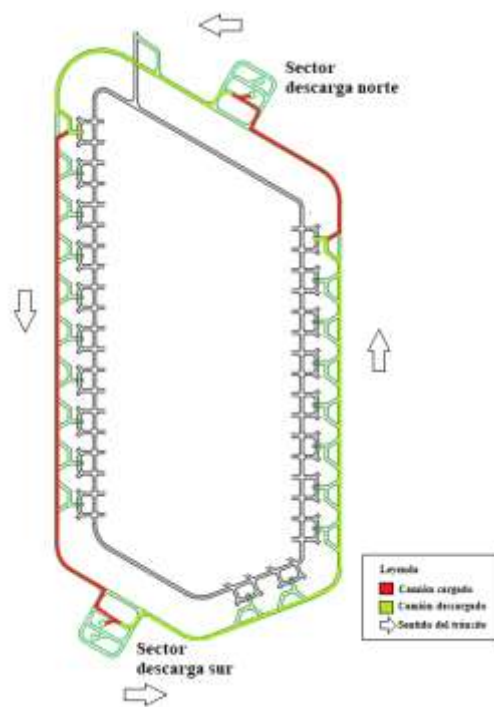


Ilustración 16. Sentido antihorario de transporte ejemplo carga en zona oeste

En los puntos de vaciado se utiliza el mismo sistema de *bucle* unidireccional en sentido antihorario, en el cual los camiones ingresan al punto de descarga que se encuentre vacío y luego sale por el lado contrario al de ingreso (Ilustración 17).

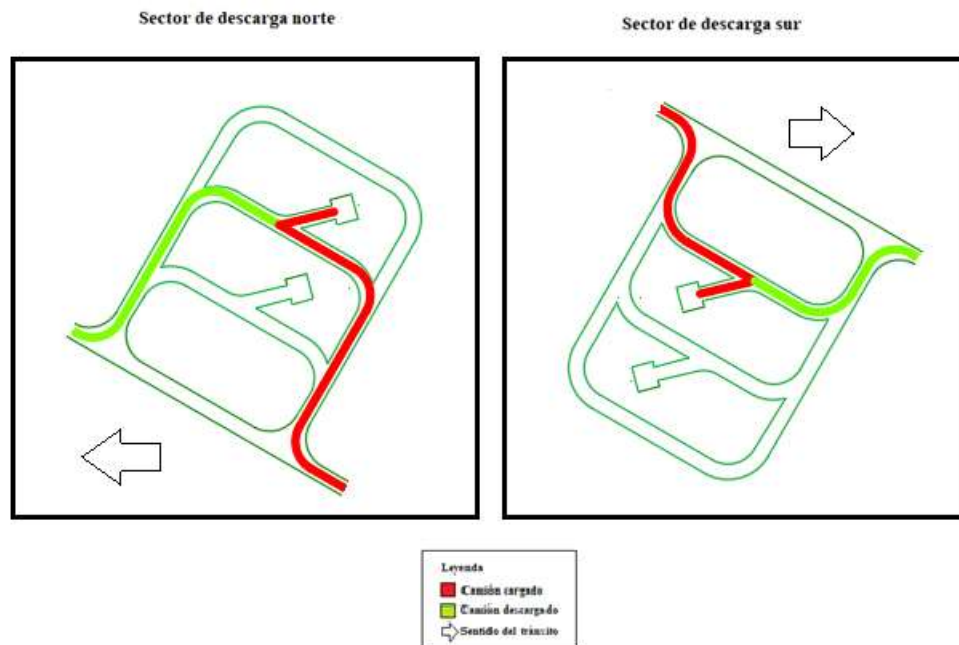


Ilustración 17. Sentido de transporte sectores de descarga Norte y Sur

Operación de excavación y construcción

Las operaciones de desarrollo de labores horizontales de excavación y construcción para preparación en la configuración convencional también son realizadas mediante operación manual, en jornadas de tres turnos por día con 4 horas efectivas por turno.

La preparación se organiza en función de la necesidad de entrada en producción de los distintos módulos de extracción, considerando que, para poder iniciar la explotación de un módulo, es necesario seguir la siguiente secuencia de ejecución de obras: En primer lugar, se hacen las excavaciones de todas las galerías del módulo, y luego se hace entrega de ésta a las cuadrillas de construcción, las cuales se encargan de pavimentar las calles y construir las obras de los puntos de extracción.

4.2. DISEÑO DE OPERACIÓN PARA EQUIPOS AUTÓNOMOS

A continuación, se presenta el diseño de la operación para equipos autónomos, el cual tiene las mismas características del diseño convencional, excepto que para la configuración para equipos autónomos se agrega una zona de transición *Z.T*, en la que los equipos autónomos pasan a operación manual o viceversa.

4.2.1. Nivel de producción

El nivel de producción para equipos autónomos es igual que en el caso de la operación convencional, excepto que en su cabecera Norte se observan tres diferentes accesos a los talleres de mantenimiento, cuyos detalles serán explicados más adelante. (Ilustración 18).

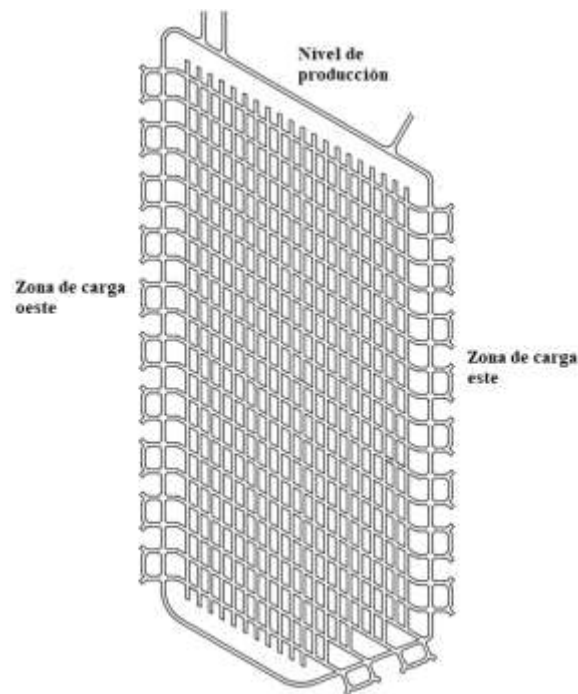


Ilustración 18. Diseño nivel de producción operación con equipos autónomos

4.2.2. Nivel transporte intermedio

De igual forma, el diseño del nivel de transporte intermedio del diseño autónomo (Ilustración 19) es igual al del diseño convencional, excepto en la cabecera Norte, donde se aprecian 2 galerías de acceso y salida a los talleres de mantenimiento autónomos y una galería que se utiliza para el ingreso y salida del taller de equipos de desarrollo y construcción manual.

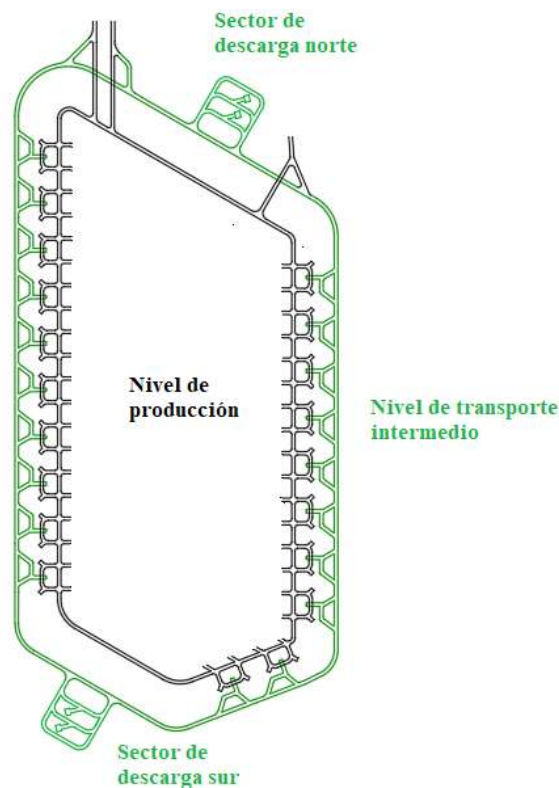


Ilustración 19. Diseño nivel de transporte intermedio operación autónoma.

4.2.3. Zona de transición

Para el ingreso de los LHD a la zona de operación autónoma, éstos deberán pasar por una zona de transición ubicada entre la zona de operación manual y la autónoma, segregada por medio de barreras físicas (portones) y barreras lógicas. La zona de transición es donde se realizará el cambio de modo de operación de autónomo a manual y viceversa.

La zona de transición (Ilustración 20), es un sector distintivo del diseño autónomo, que permite destinar un sector para cambiar de sistema de operación autónomo a manual. De esa forma los equipos pueden ser trasladados al taller de mantenimiento de forma segura, tanto para los trabajadores como para los equipos *LHD* y camiones autónomos. Esta zona se ubica en la misma cota del nivel de producción, posee dos galerías principales, la que en la figura se ubica a la derecha, corresponde a la entrada de los equipos autónomos a la zona de talleres y la de la izquierda, es la salida hacia la zona de la operación autónoma, ambas galerías cuentan con un par de accesos desde o hacia los niveles de carguío y transporte.

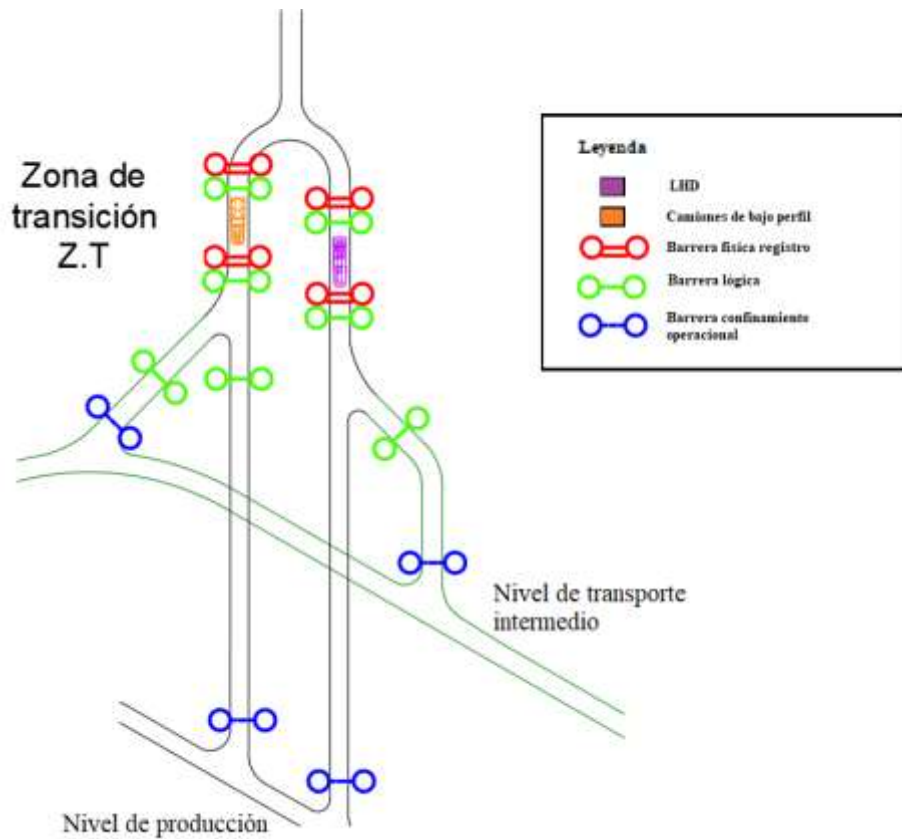


Ilustración 20. Barreras de físicas y de confinamiento en la zona de transición

El propósito de la zona de transición es:

- Disponer de espacios permanentemente separados para los accesos a los talleres de mantenimiento de equipos autónomos y manuales.
- Definir un sistema de tránsito sencillo de realizar para evitar toma de decisiones complejas de los equipos autónomos.

Para brindar seguridad a los trabajadores, cada rama (de ingreso o salida) cuenta con dos barreras físicas y digitales cuyas funciones son aislar los equipos en el momento de pasar de un sistema al otro en el único lugar donde se puede hacer esa operación. Una vez comprobado que los equipos autónomos están detenidos y aislados, sin riesgos para los trabajadores, estos hacen ingreso al sector tomando el control del equipo, finalmente los trabajadores dan la instrucción de abrir las barreras y para dirigirse manualmente al taller de mantenimiento. Para la salida hacia la zona autónoma, se lleva a cabo la misma operación, pero en el sentido contrario.

Esta zona de transición es de uso exclusivo de la flota de equipos autónomos, por lo cual para los equipos de operación manual existe otro acceso el cual es de entrada y salida. De esta forma se hace una segregación física y espacial de los equipos para tener nula interacción entre ambas operaciones.

La segregación espacial también se favorece con la operación de transporte por el bucle antihorario el cual genera un sistema sencillo de tránsito sin interferencias y mínimas decisiones controladas por semáforos (ópticos y digitales). La operación en *bucle* reduce las posibilidades choques y/o detenciones del sistema por eventos no deseados.

4.2.4. Barrio cívico y taller de mantenimiento

Las infraestructuras de servicio del diseño autónomo se ubican en la zona norte (Ilustración 21), a la misma cota del nivel de producción. La diferencia con la configuración convencional es que en este caso hay dos talleres de mantenimiento, uno específico para dar mantenimiento de los equipos autónomos (camiones y *LHD*), y otro para los equipos con operador a bordo. Entre estos últimos están tanto los equipos de reducción secundaria y otros utilitarios de producción, como los jumbos y otros equipos de desarrollo y construcción.

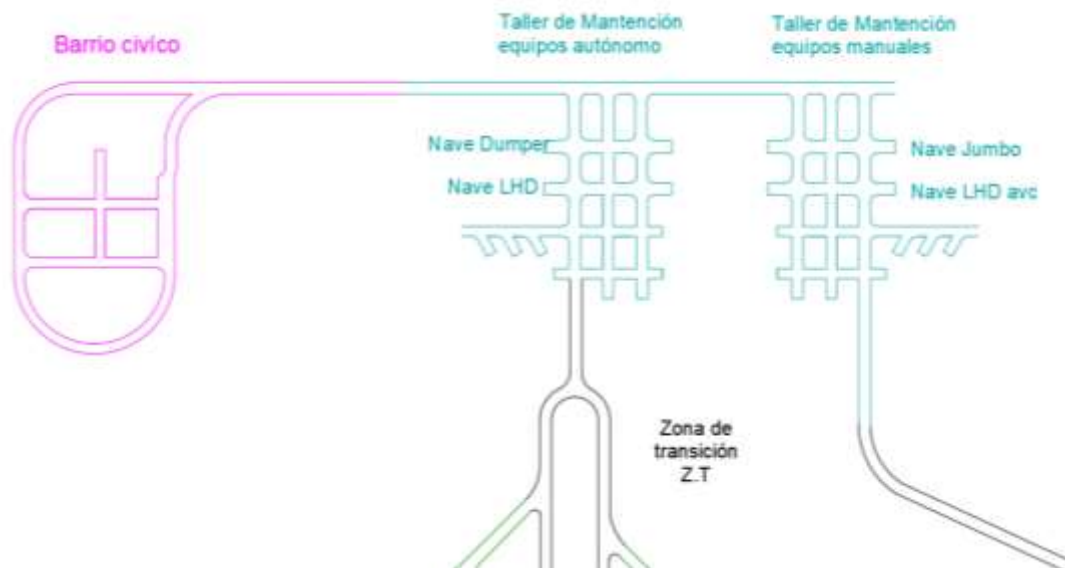


Ilustración 21. Infraestructura de servicios diseño autónomo

4.2.5. Dimensionamiento flota

El dimensionamiento de la flota para el diseño autónomo también considera el uso de equipos *LHD* con descarga directa a los camiones de bajo perfil, solo que en este caso los equipos son autónomos.

Para el dimensionamiento (Tabla 8) los datos son los mismos que en la configuración convencional excepto en la organización y horarios de turnos de trabajo. Para configuración con autónomos se considera un turno de 16 [h/d] para operación exclusiva de equipos autónomos de producción y transporte intermedio y otro turno de 8 [h/d] para realizar todas las labores que se realizan con equipos con operador a bordo.

Entre las labores realizadas con equipos con operador a bordo están: las excavaciones y construcción de preparación y las de apoyo a la producción, entre las que se destacan la reducción secundaria, el descuelgue de puntos de extracción y las actividades de reparación de instalaciones.

También se ha considerado una diferencia en el índice de utilización de equipos autónomos, el cual mejora a 85% debido a la eliminación de pérdidas operacionales asociadas al trabajo humano.

Tabla 8. Consideraciones dimensionamiento de flota diseño autónomo.

Datos para dimensionamiento de flota	
Producción diaria [t/d]	40000
Capacidad <i>LHD</i> [m ³]	8,4
Capacidad camiones [m ³]	30
Densidad [t/m ³]	2,6
Relación de vacíos	0,5
Factor de llenado [%]	85%
Disponibilidad física [%]	80%
Utilización [%]	85%
Numero de turnos [un]	1
Horas de trabajo efectivo [h/d]	16

El dimensionamiento de la flota para este diseño se evalúa de igual forma a la del diseño autónomo, considerando las mismas rutas críticas del módulo de operación 1 y 2, y módulo de operación 19 y 20. Obteniendo así que el diseño requiere de 7 [un] de *LHD* (Tabla 9) y 6 [un] camiones de bajo perfil (Tabla 10).

Tabla 9. Dimensionamiento equipos LHD diseño autónomo

Equipos LHD	
Capacidad [t]	12,4
Rendimiento LHD [t/h]	365
Rendimiento diario [t/d]	5.832
Numero de equipos LHD [un]	7

Tabla 10. Dimensionamiento por sector para camiones diseño autónomo

Dimensionamiento Camiones		
	Transporte Lado W	Transporte Lado E
Capacidad [t]	44,2	44,2
Número de baldadas [un]	3	3
Carga efectiva camión [t]	37,2	37,2
Rendimiento Camión [t/h]	206	206
Rendimiento diario [t/d]	3.298	3.298
Número de camiones [un]	6	

4.2.6. Operación diseño autónomo

La forma en la que operan los equipos en este diseño se puede segmentar en operación autónoma, la cual corresponde a la operación de equipos LHD en el nivel de producción y camiones de bajo perfil en el nivel de transporte intermedio, y operación manual en el desarrollo de labores mineras como excavaciones y construcción de túneles.

Los LHD operan cada uno una unidad de explotación (módulo), los cuales requieren un sistema de confinamiento utilizado para confinamiento perimetral, operacional y zona de registro (zona de transición). Dicho sistema de confinamiento está conformado por barreras duras, barreras automáticas y/o barreras lógicas (Ilustración 22) cuya función principal está enfocada en la protección de personas y generar segregación operacional de los LHD autónomos. En cuanto a las barreras físicas y digitales, estas tienen la función de permitir o restringir el acceso de equipos o personal al sector de aquellos módulos que se encuentran operativos, generar un ambiente separado y segregado en el cual el equipo autónomo queda libre de interrupciones.

Los confinamientos perimetrales se utilizan para segregar módulos adyacentes para que los LHD no pasen la calle del módulo al cual están asociados, están conformados por una barrera dura y una barrera lógica, las que se mantendrán normalmente cerradas mientras se encuentren equipos operando en módulos adyacentes.

Por otro lado, los confinamientos operacionales se utilizarán para restringir el acceso de equipos autónomos de un módulo a otro en el sector de las cabeceras, permitiendo así asegurar la independencia de la operación autónoma de los *LHD*, están conformados por una barrera dura y una barrera lógica y se ubican principalmente en las cabeceras este y oeste.

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

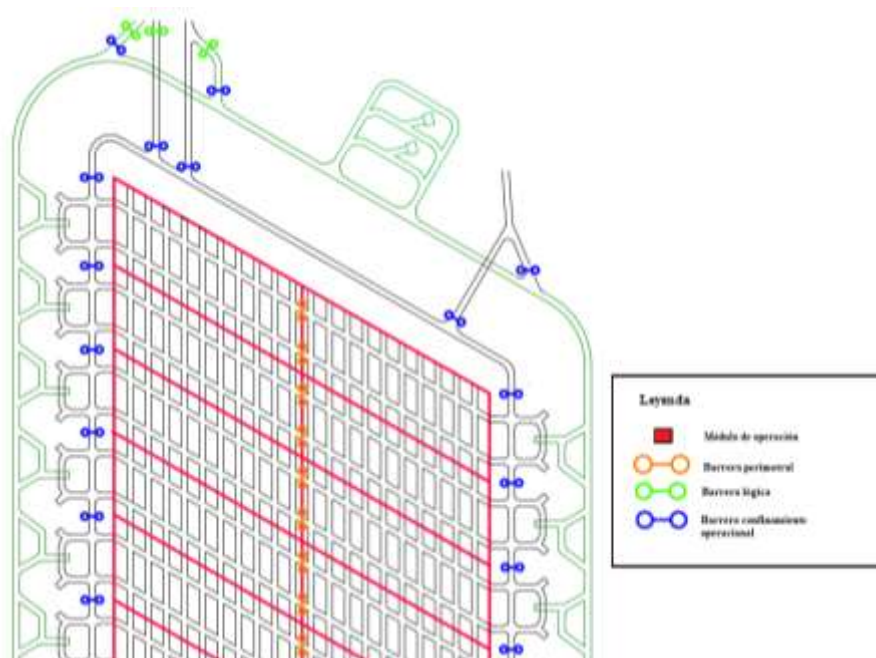


Ilustración 22. Barreras segregación física nivel de producción

Además, se considera el uso de un código de luces (Vega, 2020) que representa el estatus de los *LHD* autónomos, este consiste un sistema de luces formado por tres colores, verde, naranja y rojo, cuya función es indicar de forma visual el estado del *LHD*. El código de luces se describe a continuación:

- Roja: Esta luz indica que el *LHD* se encuentra en modo de operación autónomo.
- Naranja: Se enciende en casos de detención rápida de los *LHD* y podrá indicar dos estados:
 - Naranja parpadeante: Indica retardo de la liberación de la parada rápida. No es posible acercarse al equipo.
 - Naranja Continuo: Indica parada rápida. Es posible acercarse al equipo.
- Verde: Esta luz indica que el *LHD* se encuentra en modo manual

4.3. COMPARACIÓN OPERACIONAL ENTRE DISEÑOS

A continuación (Tabla 11), se muestra la comparación de las variables principales entre ambos diseños, como el modo de operación, la infraestructura, turnos, requerimiento de equipos, entre otros.

Tabla 11. Resumen comparativo de ambos diseños operacionalmente

	Diseño operación convencional	Diseño operación autónoma
Nivel de producción	<ul style="list-style-type: none"> • Producción: Manual • Excavación: Manual • Construcción: Manual 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción: Autónomo • Excavación: Manual • Construcción: Manual • Sistema de confinamiento <i>LHD</i> • Código de luces • Segregación física y temporal
Nivel de transporte intermedio	<ul style="list-style-type: none"> • Bucle de transporte unidireccional sentido antihorario • Bucle zona de descarga unidireccional sentido antihorario • Equipos manuales 	<ul style="list-style-type: none"> • Bucle de transporte unidireccional sentido antihorario • Bucle zona de descarga unidireccional sentido antihorario • Equipos autónomos
Infraestructura de servicios	<ul style="list-style-type: none"> • Barrio cívico: Infraestructura única para ambos niveles en el nivel de producción • Taller de mantención: Único ubicado en el nivel de producción con acceso común. 	<ul style="list-style-type: none"> • Barrio cívico: Infraestructura única para ambos niveles en el nivel de producción • Taller de mantención: Separados, uno para equipos autónomos y otro para equipos manuales con accesos separados.
Zona de transición	No	Si, ubicada en cabeceras Norte

CAPÍTULO 5. SEGREGACIÓN TEMPORAL OPERACIONES

La segregación temporal de las operaciones de producción y preparación de las labores mineras corresponde a la reestructuración del sistema de turnos actual de tres turnos por día, en el los cuales se desarrollan todas las operaciones en conjuntos y coexistiendo al interior de la mina, para pasar a tener solo dos turnos, uno donde solo operan equipos autónomos para realizar la producción y otro donde se realizan excavan y construyen las labores mineras mediante equipos con operador abordo.

En el caso de esta investigación se considera en primera instancia un turno autónomo de 16 [h/d], dejando de esta manera al turno manual con 8 [h/d], sin embargo, dicha distribución de tiempos de los turnos debe ser evaluada para verificar el cumplimiento de los requerimientos de producción y desarrollos horizontales, para ver su factibilidad de implementación.

A continuación, se desarrollará esta idea buscando diferentes configuraciones de cuadrillas y frentes de excavación, con el fin de escoger aquella alternativa que permita dar cumplimiento a los requerimientos antes mencionados.

5.1. ANÁLISIS PREPARACIÓN Y DESARROLLO EXCAVACIONES

Como se indica en capítulos anteriores, el requerimiento de producción corresponde a 40 [kt/d], ahora bien, en base a este y a las alturas de las columnas que se pudieran obtener en una mina de hundimiento por bloques o paneles, variando estas entre 230 [m] a 350 [m], se obtienen las cubicaciones de preparación horizontal como se muestra en la (Tabla 12; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 15), estas últimas representan la demanda anual de puntos de extracción que requiere incorporar el diseño expresada en [m/año].

Tabla 12. Requerimiento de preparación horizontal e incorporación de puntos de extracción por año

Altura columna [m]	Área Reemplazo [m ² /año]	P.E a reemplazar [un/año]	Cubicación de preparación horizontal [m/año]
350	15.824	72	2.160
330	16.783	76	2.280
310	17.866	81	2.430
290	19.098	87	2.610
270	20.513	93	2.790
250	22.154	100	3.000
230	24.080	109	3.270

Desde la Tabla 12 se puede observar que la altura de columna de 230 [m] corresponde al caso más desafiante y la altura de 350 [m] al menos desafiante, por ende, las configuraciones de cuadrillas y frentes de excavación, para la segregación temporal con 8 [h/d] de operación manual, deben satisfacer la condición más desafiante para que su utilización sea factible, esto en primera instancia, ya que, falta determinar si esta cumple los requerimientos de producción, para definir si es o no factible su utilización.

5.2.PROGRAMACIÓN DE EXCAVACIONES

Para determinar si se logra satisfacer el requerimiento de preparación con un único turno de 8 [h/d], para lo cual es necesario realizar una programación de las actividades de excavación y construcción de los niveles de explotación. En primer lugar, se define como se distribuyen los tiempos en el turno, el cual considera los siguientes períodos de tiempo inhábil (Ilustración 23): cambio de turno al comienzo, colación a medio turno y cambio de turno al final de la jornada en el que también se hace el paso de operación manual a autónoma. Los horarios de colación y término de turno, también están definidos para realizar tronaduras (pintados de color gris).



Ilustración 23. Configuración de los turnos de operación con operador a bordo

Para la planificación se considera la duración de las operaciones unitarias del ciclo de excavación señaladas en la Tabla 13, correspondientes a los niveles de producción y transporte intermedio, cuyo cálculo se presenta en el Anexo B.

Tabla 13. Tiempos estándar de operaciones unitarias de excavación.

Avance común para NP y NTI [h/disparo]	
Marcar y perforar	4
Cargar explosivos	2
Tronar y ventilar	1
Acuñar y regar	1
Refuerzo transitorio	1
Sacar marina	2
Perno definitivo	4

Malla	2
Hormigón proyectado	3
Tiempo total desarrollo	20

Los valores de la Tabla 13 están aproximados a la unidad de hora, para de esta forma contener dentro de sí las pérdidas operacionales asociadas al trabajo humano y especialmente el tiempo de cambio o traslado de equipos de una frente a otra.

Con este antecedente se generan una serie de programaciones para ambas configuraciones en turno de 8 [h/d]. En Ilustración 24 cada casilla representa 1 hora y corresponde a un extracto de un caso que considera tres cuadrillas de excavación trabajando en tres frentes cada una. En la figura las casillas de colores representan las frentes.

La programación se realiza por mes para todos los días del año considerando 30 [días/mes], de esta forma se obtienen los metros de avance anual [m/año] y los días trabajados equivalentes a 360 [días], considerando distintas configuraciones del trabajo variando la cantidad de cuadrillas de trabajo y la cantidad de frentes disponibles para cada una de ellas.

El detalle de la programación se adjunta en el Anexo D, donde se observa que para configuraciones de cuadrillas y frentes equivalentes, como por ejemplo, una configuración de una cuadrilla con dos frentes (1C/2F) y una de dos cuadrillas y una frente (2C/1F), se obtienen los mismos rendimientos. A continuación, en la (Tabla 14), se presenta la capacidad de preparación correspondiente a cada configuración expresada en metros de avance por año [m/año]:

Tabla 14. Avances por año y por configuración turno de 8 [h/d]

Horas por turno con equipo manual [h/d]	8
Calles/Frente	Avance [m/año]
3C/3F	3.780
3C/2F	2.520
2C/2F	1.680
3C/1F	1.260
2C/1F	840
1C/1F	420

En el Gráfico 1 se contrastan los requerimientos de preparación horizontal más y menos demandantes con las capacidades de preparación de las configuraciones en estudio, lo cual permite verificar gráficamente cuales cumplen con el requerimiento de preparación y de esta forma descartar del análisis aquellas que no cumplan.

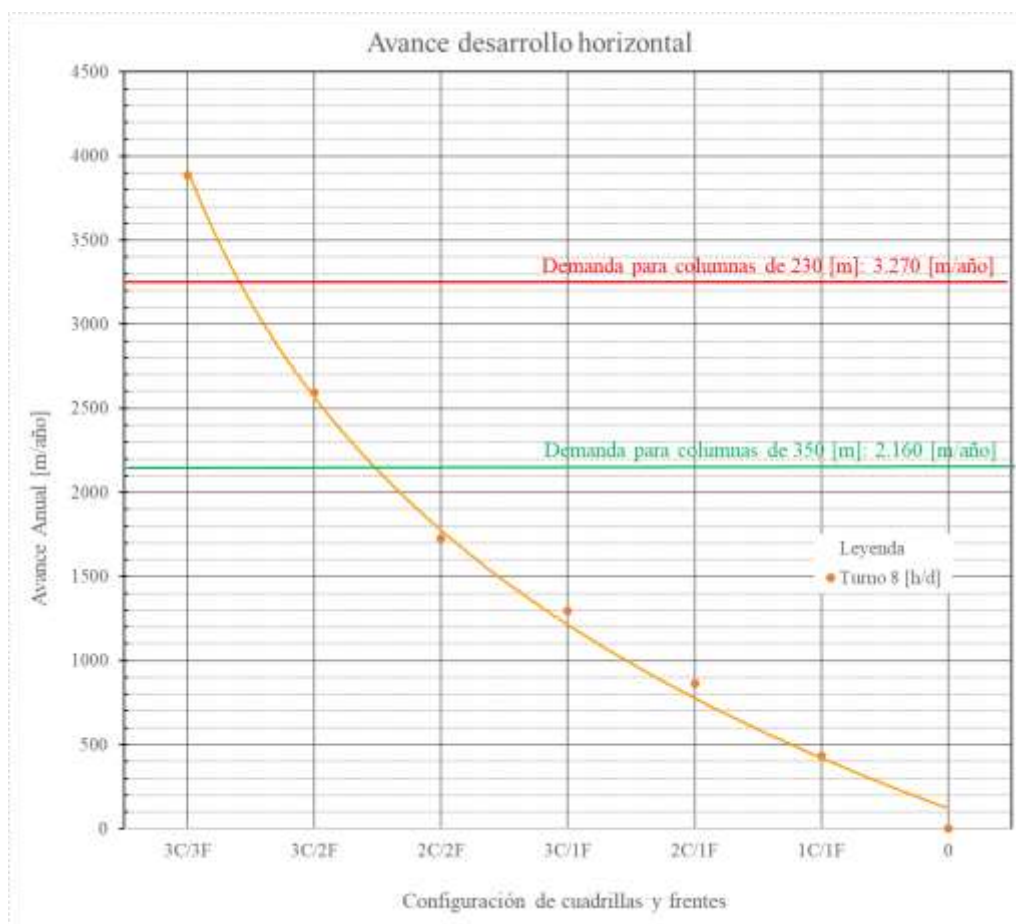


Gráfico 1. Avance desarrollo horizontal en función de las configuraciones

Del Gráfico 1 muestra que solo la configuración de tres cuadrillas con tres frentes (3C/3F) logra satisfacer el requerimiento de preparación horizontal más demandante de 3.270 [m/año], correspondiente a alturas de columna de 230 [m].

CAPÍTULO 6. PLANIFICACIÓN DISEÑO AUTÓNOMO

Una vez verificado el cumplimiento de la preparación, es necesario verificar la compatibilidad de las operaciones autónomas y no autónomas, mediante la planificación de las actividades principales del diseño, estas son producción, excavación y construcción, todas dependientes entre sí en cuanto al tiempo que tardan en realizar sus actividades en los módulos de operación para dar paso a la actividad siguiente.

Ordenando cronológicamente las actividades se realizan en las galerías, se tiene en primer lugar la excavación, una vez finalizada esta operación, llega el equipo de construcción quien realiza la terminación de las galerías pavimentado y construyendo los puntos de extracción, para una vez terminadas las labores entregarlas a producción quien se encarga de la explotación del mineral.

Referente a la planificación de la excavación y construcción de las labores horizontales, ambas operaciones son claves para mantener en régimen la producción, ya que, se requiere que los túneles estén terminados para poder ser entregados a la producción autónoma. En este sentido es importante reiterar que tanto las actividades del ciclo de excavación como la construcción son realizadas de forma manual para el diseño autónomo según la segregación temporal planteada anteriormente.

6.3. VIDA ÚTIL DE LOS MÓDULOS

Como se mencionó en capítulos anteriores, dentro de la operación existen tres diferentes tipos de módulos, los cuales difieren entre sí en términos de forma, dimensiones y cantidad de puntos de extracción que poseen, por lo tanto, estos tienen diferentes tiempos de vida útil. Se tienen así los módulos del 1 al 16 con 40 [un] puntos de extracción cada uno, los módulos 17 y 18 los cuales si bien difieren en cuanto a forma respecta, poseen la misma cantidad de puntos de extracción contando con 36 [un] cada uno, y finalmente se tienen los módulos 19 y 20 los cuales son los más pequeños, poseen diferente forma, e igual cantidad de puntos de extracción con 26 [un] cada uno.

La vida útil de estos módulos depende directamente de la altura de columna, por lo tanto, como se mostró en el capítulo de segregación temporal, la altura de columna que genera la condición más desafiante es de 230 [m], ya que, esta presenta la menor vida útil para los módulos, por lo que debe ser evaluada en contraste con los tiempos de construcción y excavación para verificar la compatibilidad de las operaciones, ya que, en esta se necesita traspasar los equipos a nuevos módulos, a medida que se agota el mineral presente en estos, dependiendo principalmente que nuevos módulos se encuentren o no excavados y construidos, para continuar con la explotación y así dar cumplimiento a los requerimientos de producción

En el Anexo E, se encuentran las cubicaciones a partir de las cuales se obtiene el tonelaje por módulo para alturas de columna de 230 [m], destacando sus valores en la Tabla 15, a partir de estos valores y los rendimientos de los equipos *LHD*, se obtienen las vidas útiles de los módulos mostrados en la Tabla 16.

Tabla 15. Cubicación tonelaje de los módulos de operación

Tonelaje por altura de columna	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Tonelaje columnas 230 [m] en [t]	5.565.706	5.035.638	5.035.638
Tonelaje columnas 350 [m] en [t]	8.469.552	7.662.928	7.662.928

Tabla 16. Vida útil módulos diseño autónomo para alturas de columna de 230 [m]

Tiempos para finalizar los módulos	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Vida útil [días]	954	863	863
Vida útil [años]	2,7	2,4	1,8

En la Tabla 16 se destaca la vida útil de los módulos para el diseño autónomo considerando la condición más desafiante para alturas de columna de 230 [m], siendo este el tiempo en el cual los equipos autónomos consumen el mineral presente en los módulos y por ende el tiempo límite que se tiene para finalizar las actividades de excavación y construcción de túneles, así para los módulos del 1-16 se requiere finalizar estas actividades en 2,7 [años], los módulos 17-18 requieren 2,4 [años] y finalmente del 19-20 requieren 1,8 [años].

6.4. TIEMPOS DE EXCAVACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Si bien existen tres tipos de módulos y la operación de producción se analiza por módulos unitarios, la excavación por el contrario se visualiza en base a dos módulos contiguos, para de esta forma poder ser entregados ambos en conjunto a la construcción.

Como se describió en el capítulo de segregación temporal, el análisis a partir de aquí se realiza para aquella configuración de cuadrillas y frente que logra satisfacer la demanda de preparación horizontal siendo esta la de 3C/3F, ahora bien esta debe evaluarse en conjunto a la construcción y producción para comprobar su compatibilidad con el diseño propuesto, a continuación, se muestran los tiempos que tarda la excavación para estos módulos según para la configuración 3C/3F con un turno de 8 [h/d] (Tabla 17), la cual se basa en las cubicaciones que se pueden observar en el Anexo E.

Tabla 17. Tiempo de actividades de excavación para configuración 3C/3F

Tiempo actividades de excavación	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
T. avance 3C/3F [años]	0,50	0,46	0,34

Por otra parte, tenemos la construcción de las labores, estas son operadas una vez finalizada la excavación y consideran el pavimentar las calles con un espesor de 0,3 [m] y confeccionar los marcos de los puntos de extracción, los valores que se usan para estimar el tiempo que tarda la construcción de los módulos de operación son, para el pavimento de calles un valor de 20 [m³/d-cuadrilla], y para la construcción de pavimento y marcos en los puntos de extracción un valor de 13 [d-cuadrilla/punto de extracción] (Núñez, 2021)

La construcción se realiza mediante cuadrillas, en el caso de este estudio se evalúa el uso de una o dos cuadrillas, el uso de dos cuadrillas se puede efectuar debido a la configuración que poseen los módulos de operación, ya que, al poseer dos calles cada uno, las cuadrillas pueden operar de forma independiente cada calle y por lo tanto no interferir en el trabajo de la otra. Además, la construcción al igual que la excavación debe efectuarse para dos módulos adyacentes, para poder pavimentar la calle completa.

Las cubriciones para definir los tiempos que tarda la construcción se pueden apreciar en el Anexo E, desde los cuales se derivan los tiempos de construcción para una y dos cuadrillas de excavación presentados en la Tabla 18.

Tabla 18. Tiempo de construcción módulos adyacentes según número de cuadrillas

Tiempo de construcción [años]	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Una cuadrilla	2,9	2,6	1,9
Termino construcción	1,5	1,3	0,9

6.5. PLANIFICACIÓN GENERAL

Definidos los tiempos que tarda cada una de las operaciones, se realiza la planificación general minera, mediante el uso de una carta Gantt, herramienta que define las actividades necesarias para completar el trabajo de un proyecto en un plazo determinado, y la relación lógica de ejecución de las actividades. Esta permite visualizar, el tiempo requerido para hacer cada una de las actividades en los módulos y la fecha en que debe iniciar y terminar. Además, hace posible entender qué actividades dependen de otras para partir y cuales pueden ejecutarse en forma simultánea.

La planificación se centra en la incorporación de módulos de operación adyacentes excavados y construidos para ser traspasados al área de producción.

En este sentido esta investigación considera 2 diferentes tipos de configuraciones de cuadrillas de construcción y excavación para desarrollar los módulos, por el lado de la construcción se tienen dos opciones de trabajo, con una o dos cuadrillas, y en cuanto a la excavación con la configuración de 3C/3F.

En cuanto a la planificación misma, esta considera los siguientes aspectos para su elaboración:

- Se realiza una planificación cuatrimestral.
- La planificación inicia con el desarrollo de las infraestructuras de servicio, galerías de acceso, zona de transición, cabeceras de ambos niveles y las zonas de descarga de los camiones. Para posteriormente pasar al desarrollo de los módulos de operación.
- La secuencia cronológica de las actividades es: excavación, construcción y producción.
- El número máximo de módulos de operación en producción trabajando al mismo tiempo corresponde a 7 [un], equivalente a los equipos necesarios en régimen para satisfacer el requerimiento de producción de 40 [kt/d] mostrado en el dimensionamiento de la flota.
- En caso de poder aplazar la excavación y construcción, se permiten holguras en base a la planificación de la producción, generando así una holgura de 1 trimestre para finalizar los módulos de construcción antes de entregarlos a producción

En base a estas consideraciones, se crea la carta Gantt para ambas combinaciones de configuraciones, mostrando en la (Ilustración 25) la planificación para el para la configuración de dos cuadrillas de construcción con 3 cuadrillas de excavación con 3 frentes (2C, 3C/3F). Donde el color amarillo representa el desarrollo de las infraestructuras de servicio, cabeceras, zona de transición, el verde representa la producción, el azul la construcción y el rojo la excavación.

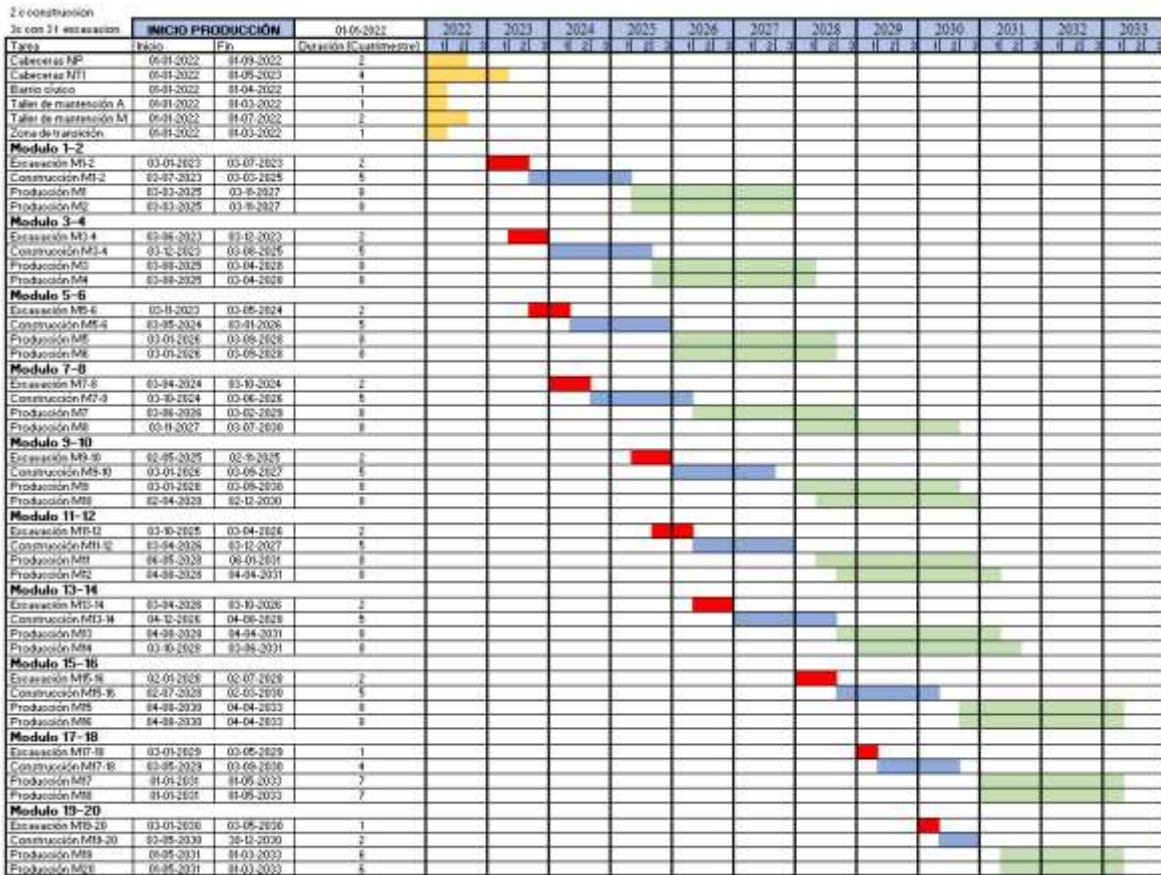


Ilustración 25. Planificación minera para la configuración de 2C, 3C/3F

6.6. ANÁLISIS DE PLANIFICACIÓN MINERA

El análisis de la planificación minera de las dos configuraciones mencionadas, es realizado para conocer finalmente si son compatibles los turnos de producción autónoma con las operaciones manuales de excavación y construcción, esto en función de la segregación temporal planteada, en base a la incorporación módulos y el cumplimiento de la producción, para de esta forma conocer cuales configuraciones de cuadrillas de construcción y excavación son factibles de utilizar para la operación con equipos autónomos.

Por otra parte, cabe a mencionar que la operación convencional, no se analiza debido a que no existen problemas para generar el desarrollo y construcción de labores mineras al tener turnos más largos para realizar este trabajo, además de ser la forma en la cual se trabaja en mayor medida en la actualidad.

En base a la planificación de las dos alternativas mencionas, se obtienen las producciones y el desarrollo por año, el número de equipos necesarios y un aspecto fundamental a la hora de analizar

la planificación, correspondiente a la cantidad máxima de módulos activos por año en el turno manual, esto debido a las interferencias que pudiesen llegar a ocurrir en la operación debido a un excesivo número de módulos activos, las cuales pueden generar perdidas operacionales por las interferencias que se podrían presentar.

El (Gráfico 2) presenta el número de módulos activos por año para cada una de las configuraciones, en este podemos observar que la configuración que utiliza una cuadrilla para la construcción, genera una mayor cantidad de módulos activos llegando en los años 2025 y 2027 a 5 [un] e inclusive el año 2026 a 6 [un], debido a esto dicha configuración queda descartada para los análisis posteriores, debido a que las interferencias podrían generar retrasos para la entrega de módulos a la producción y por ende no cumplir el requerimiento de tonelaje. Caso contrario ocurre con la configuración con 2 cuadrillas de construcción, ya que, está en promedio rondan entre 2-3 módulos máximos activos por año, por lo tanto, los análisis finales se centrarán en la configuración de 2C, 3C/3F.

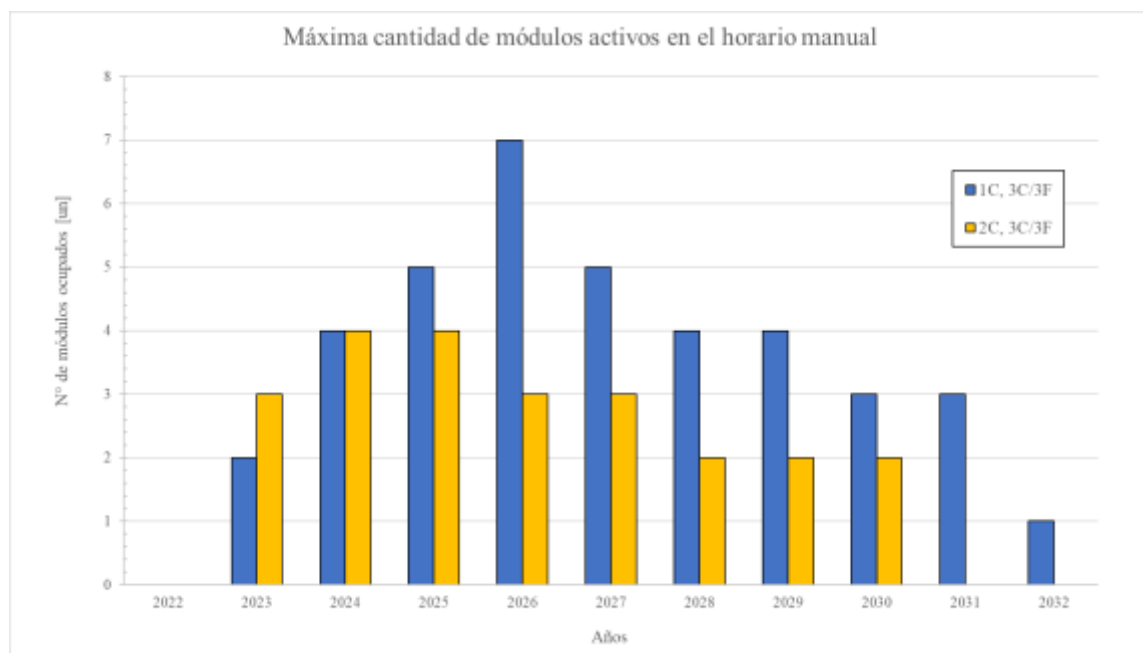


Gráfico 2. Máxima cantidad de módulos activos por año por configuración

Continuando con el análisis a continuación se presenta el plan de producción, en el (Gráfico 3) donde se muestra la producción anual en millones de toneladas [Mt], realizado para la configuración con dos cuadrillas de construcción. Lo más importante a analizar de este grafico es el cumplimiento de la producción, para ello la configuración debe llegar a régimen y mantenerse por un par de años. Además, el grafico muestra cumplimiento de producción con una línea de color rojo, el cual

corresponde a 14,4 [Mt/año], resultantes de operar con 7 equipos *LHD* autónomos en el horario definido de 16 [h/d] cumpliendo así los requerimientos de producción planteados al inicio de esta investigación. En este sentido la alternativa logra el objetivo y se mantienen en régimen por 5 [años].

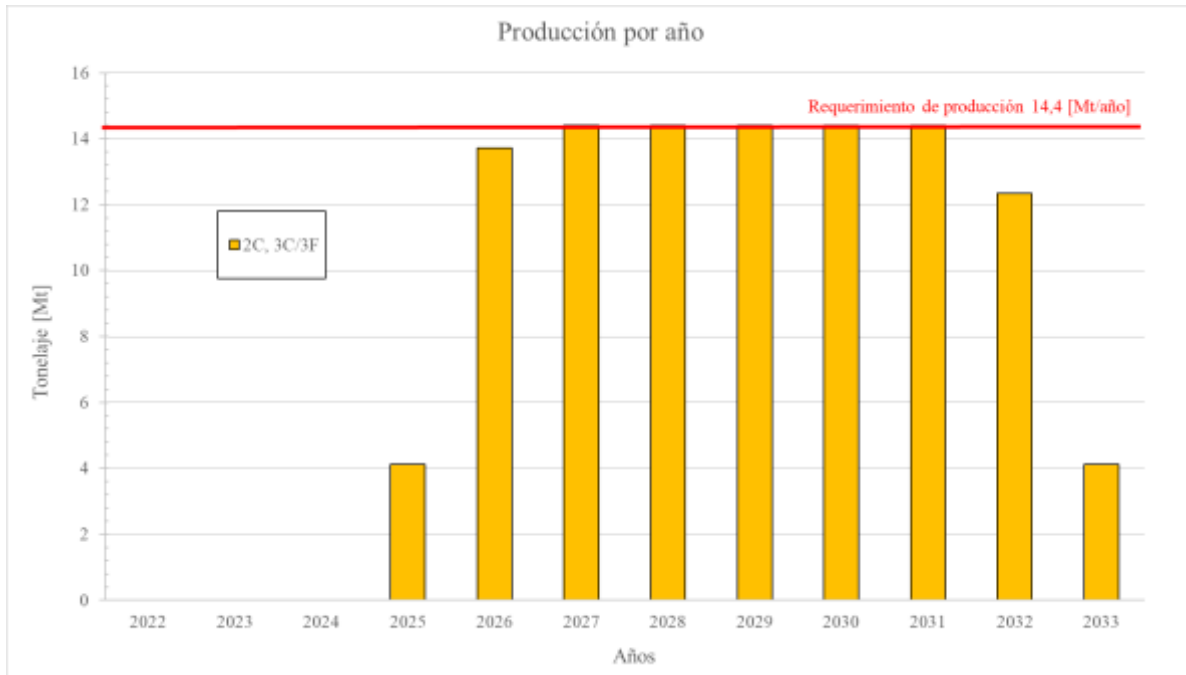


Gráfico 3. Plan de producción por año para la configuración 2C, 3C/3F

6.7. EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA

En base a la planificación minera, se realiza una evaluación técnica económica, en la cual se comparan los costos entre el diseño convencional y el diseño autónomo con la configuración 2C, 3C/3F.

En primer lugar, tenemos los costos de inversión (*CAPEX*), estos se dividen en dos los de infraestructura y los de adquisición de equipos. En cuanto al *CAPEX* de infraestructura el detalle de las cubriciones y costos de este se puede observar en el Anexo F, resumiendo dichos costos en la (Tabla 19), la cual muestra los costos de inversión de desarrollo de las labores mineras para el diseño convencional y el autónomo, los costos asociados al nivel de producción incluyen el desarrollo de las cabeceras y frontones, infraestructuras de servicios y zona de transición, y los costos de inversión del nivel de transporte intermedio las cabeceras, y las zonas de carga y descarga, desde estos se puede apreciar que el diseño autónomo requiere una inversión de capital mayor de \$4,2 [MUS\$], este incremento se debe principalmente a la confección de la zona de transición y del taller de mantenimiento.

Tabla 19. Costos de inversión de desarrollo en [MUS\$]

CAPEX infraestructura	Convencional	Autónomo
Nivel de producción [MUS\$]	\$ 7,12	\$ 7,52
Cabeceras	\$ 7,0	\$ 7,0
Frontones	\$ 0,1	\$ 0,1
Portones confinamiento	\$ -	\$ 0,4
Barrio cívico [MUS\$]	\$ 1,63	\$ 1,63
Zona de transición [MUS\$]	\$ -	\$ 1,49
Taller de mantenimiento [MUS\$]	\$ 2,45	\$ 4,75
Nivel de transporte intermedio [MUS\$]	\$ 21,68	\$ 21,68
Cabeceras	\$ 9,4	\$ 9,4
Zona de descarga	\$ 3,1	\$ 3,1
Zona de carga	\$ 6,2	\$ 6,2
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras	\$ 3,0	\$ 3,0
Costo total [MUS\$]	\$ 32,9	\$ 37,1

Por otra parte, se tienen los costos de inversión asociados a la adquisición de los equipos, donde la inversión en autónomos es mayor en 1 - 1,3 [MUS\$] que los manuales (ver Anexo F), siendo estos valores los siguientes:

- Manual
 - LHD: 1,5 [MUS\$/un]
 - Camiones: 2,6 [MUS\$/un]
- Autónomo
 - LHD: 2,5 [MUS\$/un]
 - Camiones: 3,9 [MUS\$/un]

Luego de los costos de inversión, se tienen los costos de operación (*OPEX*) de construcción y producción, la (Tabla 20) muestra el *OPEX* de la construcción de las labores por metro cuadrado construido, dando un total para este de 532 [US\$/m²] para ambos diseños al ser los dos construidos de forma manual y la misma cantidad de laboreo.

Tabla 20. Costos de operación de construcción

OPEX de construcción	Convencional	Autónomo
Desarrollo calle de producción [MUS\$]	\$ 24	\$ 24
Desarrollo galería zanja [MUS\$]	\$ 42,3	\$ 42
Desquinche malla [MUS\$]	\$ 1,9	\$ 1,9
Fortificación intersección con cables [MUS\$]	\$ 0,8	\$ 0,8
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras [MUS\$]	\$ 5,6	\$ 5,6
Suministro y construcción punto de extracción [MUS\$]	\$ 16,5	\$ 16,5
Costo total [MUS\$]	\$ 91,0	\$ 91,0
Costo de operación [US\$/m ²]	\$ 532	\$ 532

Adicional a los costos de operación de construcción se tienen los costos de operación de producción, el desglose de los costos se puede ver en el Anexo F. A continuación, se muestran los OPEX de producción para los *LHD* y camiones de bajo perfil de ambos diseños

- Manual
 - LHD: 1,03 [US\$/t]
 - Camiones: 0,33 [US\$/t]
- Autónomo
 - LHD: 0,97 [US\$/t]
 - Camiones: 0.32 [US\$/t]

Continuando con los OPEX, a través de la planificación minera se tienen tanto los [m²/año] construidos mostrados en el (Gráfico 4), en los cuales se destaca que dichos costos son los mismos que usan los equipos manuales al tener que construir la misma cantidad de obras que el diseño manual en cuanto a la infraestructura de los módulos. Por otro lado, el OPEX de producción se obtiene en base el tonelaje movido por año del plan de producción (Gráfico 3) en contraste con los costos de operación manual y autónomo por tonelajes mostrados anteriormente.

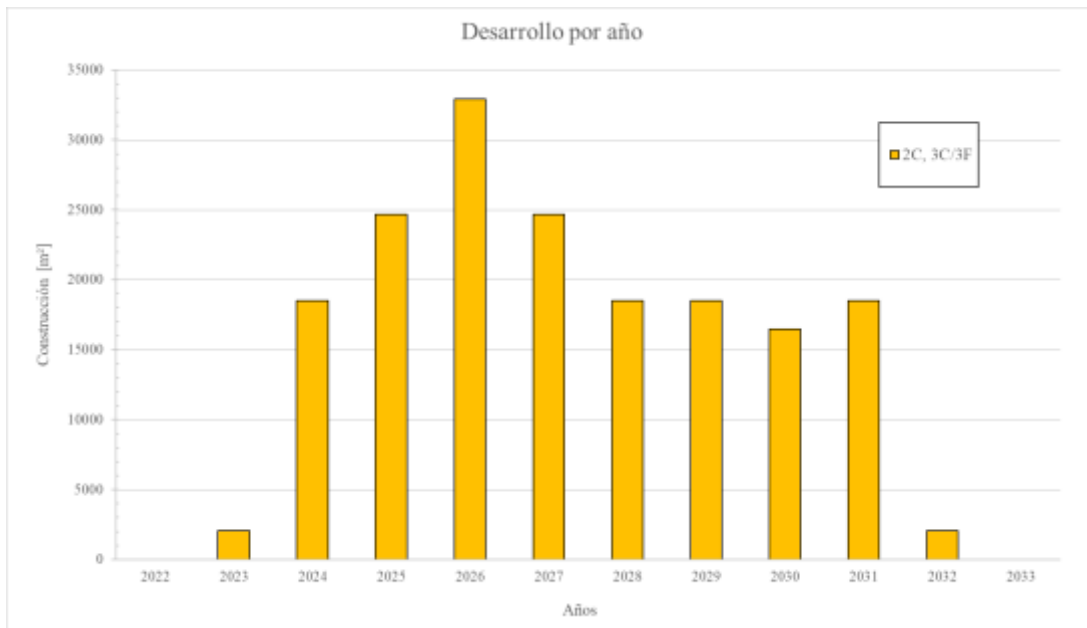


Gráfico 4. Construcción por año para configuraciones de excavación con dos cuadrillas de construcción

Detallados el *CAPEX* de infraestructura y adquisición de equipos, y el *OPEX* de construcción y operación, se realiza una valorización actual de los costos (*VAC*), para ambos diseños, para comparar en base a este en cuanto se incrementan o disminuyen los costos con la implementación de los equipos autónomos con el criterio de segregación temporal descrito en esta investigación.

Así, se realiza un flujo de costos por año que se puede apreciar en el (Anexo F), el cual permite ver los costos que se tendrán en el tiempo durante la vida de la mina para ambos diseños, en este sentido el (Gráfico 5), permite observar los costos descontados acumulados comparando los diseños autónomo y convencional.

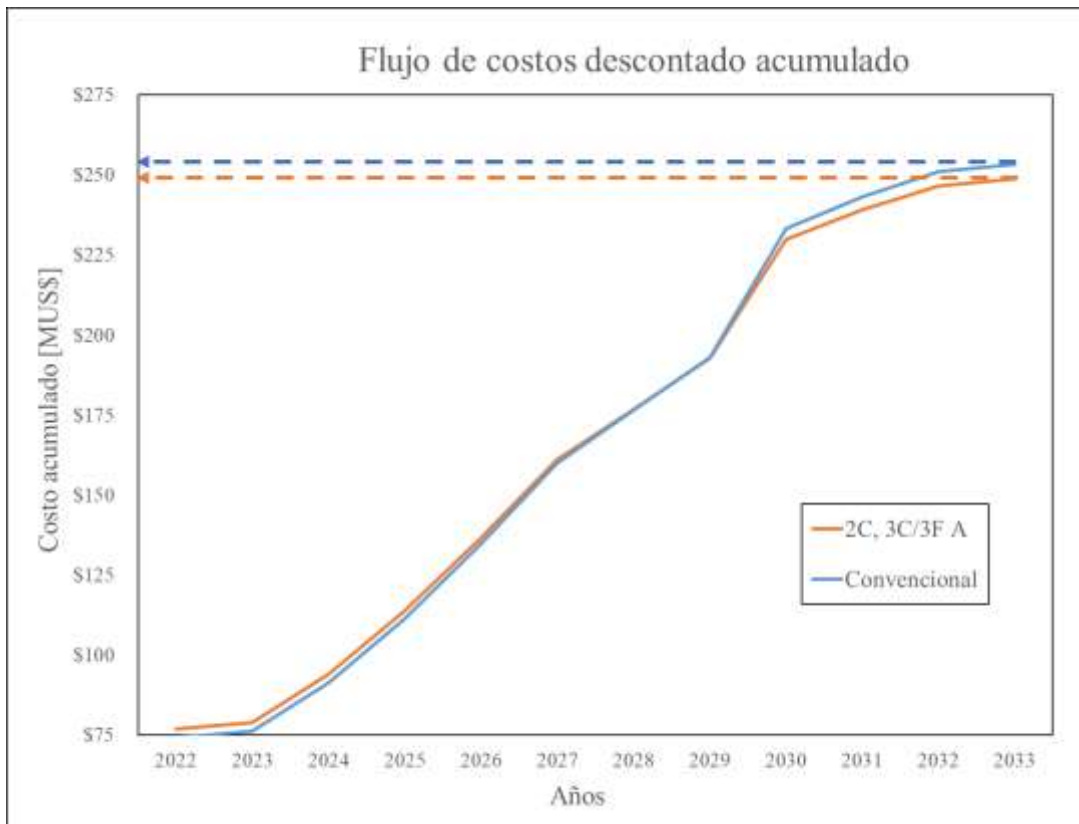


Gráfico 5. Construcción por año para configuraciones de excavación con dos cuadrillas de construcción

Tabla 21. Evaluación económica de las configuraciones

Evaluación de costos	Autónomo	Convencional
Tasa de descuento	8%	8%
CAPEX [MUS\$]	\$ 78,5	\$ 75,8
VAC [MUS\$]	\$ 250,4	\$ 254,9

Finalmente, se puede apreciar en base al (Gráfico 5) y la (Tabla 21) que el diseño autónomo con las configuraciones de dos cuadrillas de construcción con tres de excavación trabajando en tres frentes posee un VAC 250,4 [MUS\$], el cual al comparar con los costos del diseño convencional se observa que al implementar el diseño autónomo propuesto se generara una disminución en los costos de un 1,8% equivalente a \$4,50 [MUS\$].

En cuanto a estos valores se aprecia que, si bien el costo de inversión inicial es mayor para el diseño autónomo en 2,7 [MUS\$], a medida que pasan los años, los costos del diseño convencional aumentan, debido a los mayores costos de operación que posee este, sumado a la mayor cantidad de equipos que requiere para su operación, apaleando de esta manera los costos de adquisición e infraestructura del sistema autónomo.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

El estudio realizado consigue proponer un diseño de operación de extracción y transporte intermedio para explotaciones mineras por hundimiento de bloques o paneles, que aprovecha el máximo potencial de la operación con equipos autónomos, verificando la posibilidad de convivencia entre operaciones autónomas y manuales, a partir de la segregación física y temporal de sus actividades.

En cuanto a la segregación física, el diseño convencional requiere una serie de modificaciones de la infraestructura minera presente, este propone implementar una zona de transición (Z.T) que permita realizar el cambio de operación de autónomo a manual de forma segura para los trabajadores, además se recomienda la separación de los talleres de mantenimiento, uno específico para equipos autónomos por el cual se ingresa a través de la Z.T, y otro con acceso restringido para equipos manuales, aislados uno del otro. Destacando además que dichas modificaciones aumentan la inversión de capital en un 12,76%, lo que se traduce en un valor de \$4,2 [MUS\$].

Por otra parte, se logra demostrar que la implementación de una segregación temporal es factible de realizar a partir de la configuración compuesta de dos cuadrillas de construcción, con tres cuadrillas de excavación y tres frentes (2C, 3C/3F), para el sistema de turnos de 16 [h/d] para operación autónoma y 8 [h/d] para la operación manual, satisfaciendo los requerimientos de producción y preparación.

Además, en base al análisis de valor actual de los costos (VAC) comparando el diseño convencional v/s el autónomo, se obtiene que este último presenta un costo de 250,4 [MUS\$], lo que, en contraste al diseño convencional, genera una disminución de los costos en un 1,8% equivalente a \$4,5 [MUS\$], valor irrelevante en cuanto a la comparación, por lo tanto, se declara un empate técnico entre ambos diseños en cuanto a los costos de implementación.

Finalmente, reconociendo la factibilidad de aplicación del diseño de operación planteado, se desprende a partir de este estudio que, para ser implementado en una mina real, esta requiere cambiar su modo de operación, construir una zona de transición, cambiar su taller de mantenimiento por uno manual y otro autónomo, y realizar un cambio de turnos de acuerdo con la segregación temporal específica de la mina a implementar el diseño propuesto, permitiendo desarrollar así un sistema de operación eficiente y seguro operado con equipos autónomos.

7.2. RECOMENDACIONES

- Promover un estudio en conjunto a una compañía minera para realizar pruebas industriales con el fin de determinar los rendimientos de los equipos autónomos de producción según el modo de operación planteado en esta investigación operando aisladamente, y de las operaciones manuales con las configuraciones de cuadrillas de construcción y excavación dependiendo de las alturas de columna presentes en la mina a estudiar. Ambas operaciones evaluadas según la segregación temporal planteada.
- Realizar programaciones computacionales en base a los datos recolectados de la prueba industrial para el turno autónomo y el manual, considerando este último la excavación y construcción de las labores según diferentes configuraciones de cuadrillas y frentes.
- Generar una simulación discreta de toda la operación en función de los datos obtenidos y la programación de las actividades realizada, para poder comprobar la compatibilidad de las operaciones en base a la planificación minera y el cumplimiento de los requerimientos.
- Finalmente, en base a todas estas recomendaciones planteadas, comparar las producciones y la preparación de las labores con los valores esperados según las características de la mina en la que se desee implementar, en base a la producción, alturas de columna, segregación temporal y los costos de implementación los cuales no pueden sobre pasar en un 10% a la del diseño convencional.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

- Abzalov, M. (2016). Mining Methods. En M. Abzalov (Ed.), *Applied Mining Geology* (pp. 5-18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6_2
- Castro, R. (2014). *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving 5-6 June 2014, Santiago, Chile*. 8.
- Darling, P. (2011). *SME mining engineering handbook* (Vol. 1). SME.
- Dragt, B. J., Camisani-Calzolari, F. R., & Craig, I. K. (2005). *An overview of the automation of load-haul-dump vehicles in an underground mining environment. IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 37-48. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01389>
- Ghodrati, B., Hadi Hoseinie, S., & Garmabaki, A. H. S. (2015). Reliability considerations in automated mining systems. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(5), 404-418. <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1091617>
- Gustafson, A. (2011). *Automation of load haul dump machines*. Luleå tekniska universitet.
- Gustafson, A., Schunnesson, H., Galar, D., & Kumar, U. (2013). Production and maintenance performance analysis: Manual versus semi-automatic LHDs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(1), 74-88. <https://doi.org/10.1108/13552511311304492>
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering*. John Wiley & Sons.
- Heath, T. (2018). *Autonomous Industrial Machines and the Effect of Autonomy on Machine Safety*.
- Larsson, J. (2007). *Reactive navigation of an autonomous vehicle in underground mines*.
- Li, J., & Zhan, K. (2018). Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, 4(3), 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>
- Marshall, J. A., Bonchis, A., Nebot, E., & Scheduling, S. (2016). Robotics in mining. En *Springer handbook of robotics* (pp. 1549-1576). Springer.
- McCarthy, N. (2009). *Autonomous systems: Social, legal and ethical issues*.

- Núñez, C. (2021). *Diseño de niveles de explotación por hundimiento para construcción mecanizada y mínima utilización de hormigón*. Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago
- Paraszczak, J., Gustafson, A., & Schunnesson, H. (2015). Technical and operational aspects of autonomous LHD application in metal mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(5), 391-403. <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1086553>
- Parreira, J., Mullard, Z., Meech, J., & Vásquez, M. G. (2009). *How automation and key performance indicators (KPI's) contribute to sustainable development in the mining industry*.
- PMCHS, V. d. (2012). *Evaluación técnica económica de la incorporación del iso de LHD SA en PMCHS*
- Roberts, J. M., Duff, E. S., Corke, P. I., Sikka, P., Winstanley, G. J., & Cunningham, J. (2000). Autonomous control of underground mining vehicles using reactive navigation. *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, 4, 3790-3795. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.845322>
- Saayman, P. *, Craig, IK* & Camisani-Calzolari, FR. (2006). Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(2), 77-86.
- Salvador, C. F. S. C. (2020). *Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea*. 145.
- Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020). Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(5), 1385-1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
- Tampier Cotoras, C. A. (2018). *Carga autónoma y su inserción en un modelo integral de operación subterránea para máquinas LHD*.



Uribe Neira, P. A. (2014). *Análisis de la funcionalidad y desempeño de la operación semiautónoma en equipos de carga; acarreo y descarga en minería subterránea Load Haul-Dump Vehicle (LHD)*.

Vega, H. A. (2020). *Metodología de automatización de LHD en minería del Caving*.

Vergara Guzmán, M. A. (2015). *Modelo de costo basado en actividades para la gestión de operaciones de una mina subterránea explotada por block caving*.

ANEXOS

Anexo A. Dimensionamiento módulo de extracción

Las galerías de los niveles de producción y transporte intermedio de las operaciones se obtienen en base a las dimensiones de las holguras y consideraciones que se utilizan, la (Figura 1 Anexo A) muestra el diseño que poseen las galerías y sus dimensiones más importantes, las cuales se obtienen de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

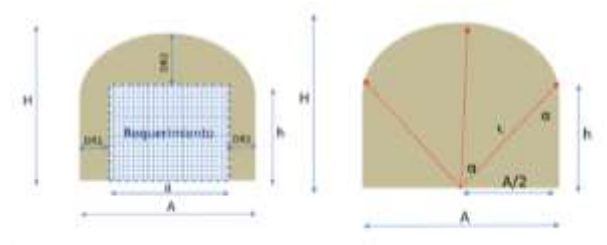


Figura (Anexo A) 1. Dimensiones de las galerías

$$A = a + 2 * DR1 [m]$$

$$H = h + DR2 [m]$$

$$r = \sqrt{(A^2/4) + h} [m]$$

$$\alpha = \tan^{-1}(A/2h) [rad]$$

$$\text{Sector circular} = r * 2\alpha [m]$$

$$T = r^2\alpha + 2A(h/4) [m^2]$$

Donde:

DR1: Distancia regulada a caja [m]

DR2: Distancia regulada a techo [m]

H: Alto galería [m]

A: Ancho galería [m]

h: Hombro [m]

r: Radio desde el centro de la galería [m]

α : Ángulo formado por el radio y el hombro de la galería

T: Sección de la galería [m²]



Tabla (Anexo A) 1. Dimensiones galerías por equipos LHD y camiones respectivamente

Modelo LHD	Proveedor	Ancho teórico [m]	Altura teórica [m]	Ancho practico [m]	Altura practica [m]	radio [m]	alfa [°]	Área techo [m ²]	Sección túnel (T) [m ²]
R2900G	CAT	4,38	4,14	4,40	4,20	3,84	34,93	9,00	15,93
R3000H	CAT	4,45	4,25	4,50	4,30	3,87	35,54	9,29	16,38
R1700G	CAT	4,36	3,81	4,40	3,90	3,84	34,93	9,00	15,93
Toro LH517i	SANDVIK	4,27	4,01	4,30	4,10	3,81	34,32	8,71	15,48
Toro LH621	SANDVIK	4,36	4,19	4,40	4,20	3,84	34,93	9,00	15,93
ST18	EPIROC	4,53	4,10	4,60	4,20	3,90	36,14	9,59	16,84
ST14	EPIROC	4,24	3,85	4,30	3,90	3,81	34,32	8,71	15,48

Modelo camión	Proveedor	Ancho teórico [m]	Altura teórica [m]	Ancho practico [m]	Altura practica [m]	radio [m]	alfa [°]	Área techo [m ²]	Sección túnel (T) [m ²]
AD60	CAT	4,55	5,55	5,00	5,60	4,7	28,52	12,4	22,4
TH663i	SANDVIK	4,71	5,55	5,00	5,60	4,7	28,52	12,4	22,4
MT54	EPIROC	4,52	5,55	5,00	5,60	4,7	28,52	12,4	22,4
TH551i	SANDVIK	4,43	5,55	5,00	5,60	4,7	28,52	12,4	22,4

Por otra parte, la inecuación de sustentación se despeja en función del ancho de galería para obtener el ancho mínimo que cumple el requerimiento de sustentación mayor o igual a 0,55.

$$Sustentación = \frac{Apilar}{Atotal} \leq 0,55 \quad (1)$$

Reemplazando la ecuación (1) por las relaciones:

$$Atotal = Dcc * E \quad (2)$$

$$Apilar = (E - Ag) * \left(E - \frac{Ag}{\sin(60)} \right) \quad (3)$$

Donde:

Dcc: Distancia entre calles medida de forma perpendicular

E: Espaciamiento entre puntos de extracción

Ag: Ancho de galerías

Apilar: Área del pilar

Atotal: Área de influencia total

Se tiene lo siguiente:

$$\frac{(Dcc - Ag) * \left(E - \frac{Ag}{\sin(60)} \right)}{Dcc * E} \leq 0,55$$

$$Dcc E - Dcc \frac{Ag}{\sin(60)} - E Ag + \frac{Ag^2}{\sin(60)} \leq 0,55 Dcc E / * \sin(60)$$

$$Ag^2 - (Dcc + E \sin(60)) Ag + 0,45 Dcc E \sin(60) \leq 0 \quad (4)$$

Reemplazando la ecuación (4) con la ecuación (5), se obtiene lo siguiente:

$$Dcc = 2 \sin(60) * E \quad (5)$$

$$Ag^2 - 3 E \sin(60) Ag + 0,9 E^2 \sin(60)^2 \leq 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) corresponde a una inecuación cuadrática cuyas soluciones derivan de la ecuación de solución cuadrática (7) obteniendo mediante esta las soluciones (8) y (9) para los anchos de galería que satisfacen la inecuación:

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

$$Ag1 = \frac{E \cdot \sin(60)}{2} (3 + \sqrt{5,4}) \quad (8)$$

$$Ag2 = \frac{E \cdot \sin(60)}{2} (3 - \sqrt{5,4}) \quad (9)$$

A raíz de estas las soluciones (8) y (9), se obtienen los valores para los anchos de galería Ag1 y Ag2 para diferentes espaciamentos de puntos de extracción, en primer lugar, es importante comentar que las soluciones Ag1 son descartadas al ser excesivamente grandes como se observa en la Tabla 2 (Anexo A), caso contrario ocurre con la solución Ag2, sin embargo esta última se compara con el ancho mínimo de equipos en el NP equivalente a 4,3 [m], motivo por el cual se descartan todas aquellas soluciones inferiores a este valor, las cuales son aquellas que se muestran en color rojo en la Tabla 3 (Anexo A).

Tabla (Anexo A) 2. Solución inecuación de sustentación para cada espaciamento de P.E.

E [m]	Ag1 [m]	Ag2 [m]
12	27,7	3,5
13	30,0	3,8
14	32,3	4,1
15	34,6	4,4
16	36,9	4,7
17	39,2	5,0
18	41,5	5,3

Tabla (Anexo A) 3. Comprobación sustentación según las soluciones obtenidas.

E [m]	Dcc [m]	Atotal [m2]	Apilar [m2]	Ag2 [m]	Sustentacion
12	20,8	249,4	137,2	3,5	55%
13	22,5	292,7	161,0	3,8	55%
14	24,2	339,5	186,7	4,1	55%
15	26,0	389,7	214,3	4,4	55%
16	27,7	443,4	243,9	4,7	55%
17	29,4	500,6	275,3	5,0	55%
18	31,2	561,2	308,7	5,3	55%

Finalmente, en base a la malla de producción seleccionada de $13,9 \times 16$ [m²] y el radio de giro del equipo, se determina el área necesaria a excavar para implementar las curvas de alta velocidad en los pilares para que el equipo logre realizar la maniobra e ingrese al punto de extracción. Para el caso de este diseño se considera un desquinche de la malla de $2,47 \times 2,83$ [m²] (Figura 2 Anexo C).

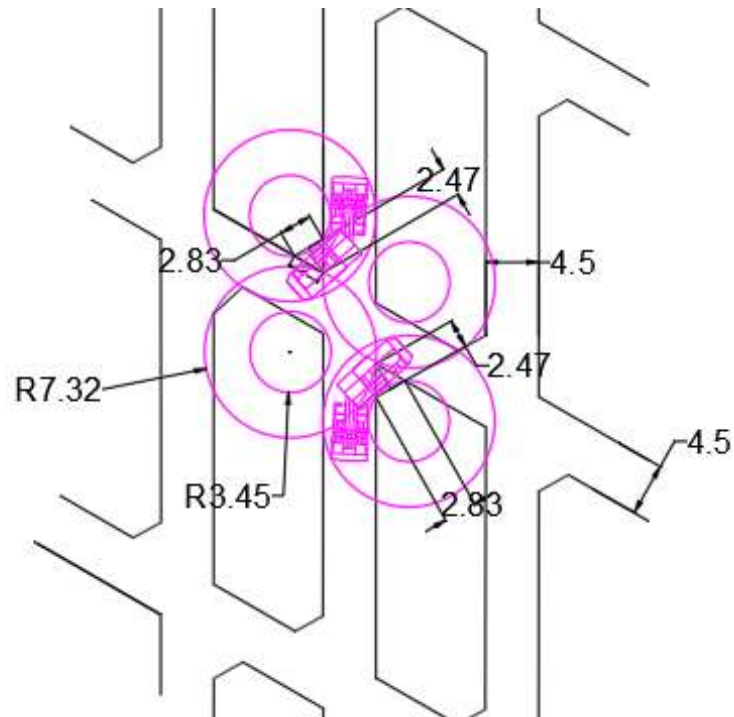


Figura (Anexo A) 2. Dimensiones curva de alta velocidad

Anexo B. Desarrollo de labores mineras

El desarrollo de las labores mineras depende del tiempo que tardan las actividades del ciclo de excavación, las dimensiones de las galerías del NP y NTI, y los diagramas de disparo de estas.

En primer lugar tenemos la excavación de las labores horizontales realizada mediante perforación y tronadura se hace siguiendo la secuencia de operaciones unitarias que componen el ciclo de excavación presentado en la (Figura 1 Anexo B), estas corresponden a las operaciones unitarias de excavación: marcado de los tiros, perforación de la frente, carguío de explosivos en los tiros, tronadura y ventilación para eliminar los gases tóxicos de la frente, acuñadura (*scaling*), refuerzo transitorio y sacar la marina. Una vez despejada la frente, se completa la segunda parte del ciclo con el refuerzo definitivo de las paredes y techo de la galería, usualmente compuesto de pernos lechados, malla y hormigón proyectado (*shotcrete*).

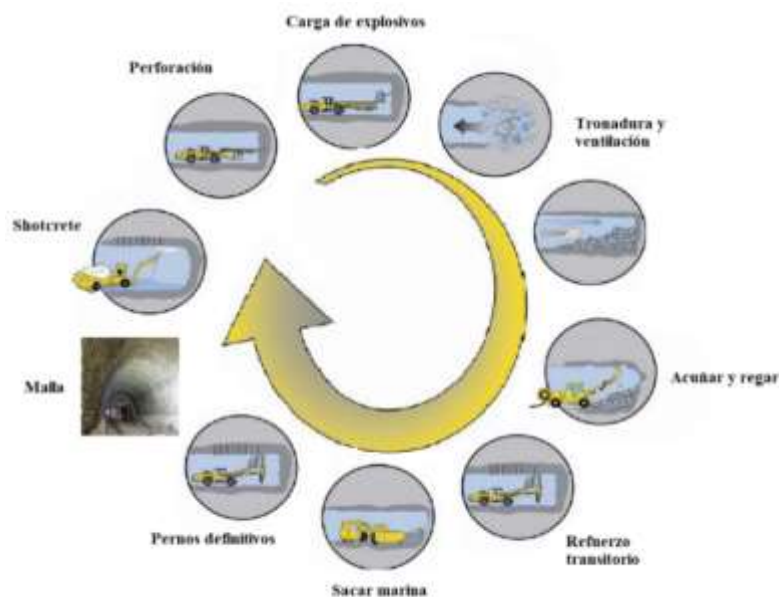


Figura (Anexo B) 1. Secuencia de actividades de excavación de labores horizontales

Ya definidas las actividades del ciclo de excavación, se muestra a continuación el diagrama de disparo de las galerías de producción y transporte intermedio, utilizado principalmente para determinar el número de tiros que se deben perforar y tronar, y por ende los metros de desarrollo de las galerías, para esto se usa el esquema de diagrama de disparo mostrado en la Figura 2 Anexo B.

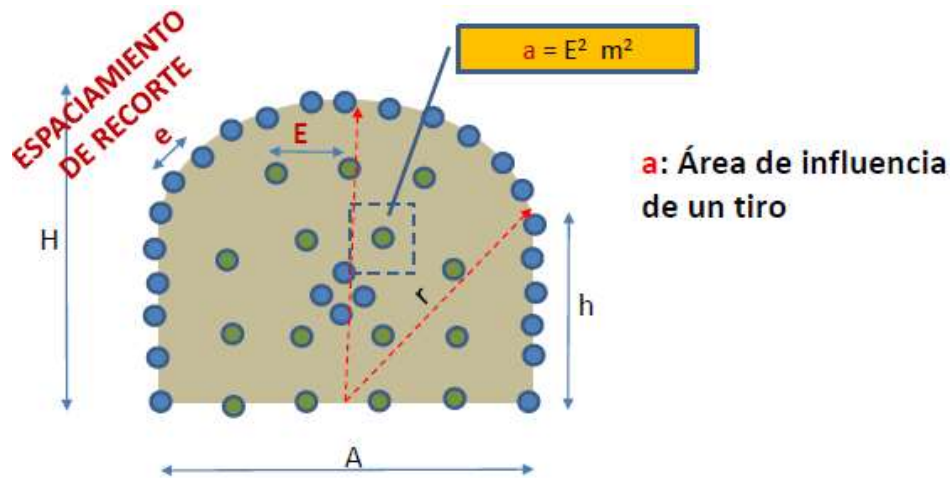


Figura (Anexo B) 2. Diagrama de disparo galerías

El diagrama de disparo en conjunto con una serie de relaciones matemáticas que se muestran a continuación (Ecuación 10 a 14), lo cual permite obtener los parámetros requeridos para etapas posteriores de la investigación.

$$E = 10 \times \text{Diám perf} [\text{pulg}] \times \text{Diám perf} [\text{m}] \quad (10)$$

Donde:

E : Espaciamiento de los tiros de arranque [m]

Diám perf : Diámetro de los tiros de arranque [pulg] y [m]

$$a = E^2 [\text{m}^2] \quad (11)$$

Donde:

a : Área de influencia de un tiro

E : Espaciamiento de los tiros de arranque [m]

$$T = r^2 \arctg(A/2h) + (A/2)h \quad (12)$$

Donde:

T : Área de la sección del túnel [m²]

A : Ancho del túnel [m]

h : Hombro del túnel [m]

r : Radio techo [m]

$$T_1 = \text{Entero Sup} [(2h + 2r \arctg(A/2h))/e] \quad (13)$$

Donde:

T_1 : Numero de tiros perimetrales [un]

e: Espaciamiento de los tiros de recorte [m]

$$T_2 = (4 \text{ o } 6) + (1 \text{ o } 2) \text{ Perforaciones huecas [doble diam.]} \quad (14)$$

Donde:

T_2 : Numero de tiros vacíos en la rainura [un]

$$T_3 = \text{Entero sup}(T/a) \quad (15)$$

Donde:

T_3 : Numero de tiros de arranque [un]

T : Área de la sección del túnel [m²]

a : Área de influencia de un tiro

$$N_p = T_1 + T_2 + T_3 \quad (16)$$

Donde:

N_p : Numero de tiros totales [un]

T_1 : Numero de tiros perimetrales [un]

T_2 : Numero de tiros vacíos en la rainura [un]

T_3 : Numero de tiros de arranque [un]

Descritas las relaciones, a continuación, en la Tabla 1 Anexo B se muestran los parámetros del diagrama de disparo de las galerías del nivel de producción y nivel de transporte intermedio.

Tabla (Anexo B) 1. Diagrama de disparo galerías nivel de producción y transporte intermedio

Diagrama de disparo	NP	NTI
Espaciamiento recorte [m]	0,35	0,35
Espaciamiento arranque [m]	0,89	0,89
Área de influencia [m ²]	0,80	0,80
Tiros perimetrales [un]	32	38
Tiros rainura [un]	5	5
Tiros de relleno [un]	21	29
Numero de tiros [un]	58	72

Por otra parte, se tienen las dimensiones de las galerías del nivel de producción y nivel de transporte intermedio consideradas para calcular los tiempos de operaciones unitarias de las mostradas en las (Tabla 2 Anexo B).

Tabla (Anexo B) 2. Dimensiones de las galerías nivel de producción y transporte intermedio

Dimensiones galería	NP	NTI
Ancho [m]	4,5	5
Alto [m]	4,1	5,6
Hombro [m]	3,15	4,00
Radio [m]	3,9	4,7
Arco techo [m]	4,8	5,3
Segmento circular [m ²]	9,3	12,4
Sección galería [m ²]	16,4	22,4
Perímetro reforzable [m]	11,1	13,3
Esponjamiento [%]	50%	50%

A continuación, para determinar los tiempos de las actividades del ciclo de excavación, se consideran las (Ecuaciones 17, 18 y 19):

$$L = L_p \times p[m] \quad (17)$$

Donde:

L: Largo perforación real [m]

L_p : Largo barra de perforación [m]

p : Avance por disparo [%]

$$SR = L \left[2h + 2r \arctg\left(\frac{A}{2h}\right) \right] \quad (18)$$

Donde:

SR: Superficie reforzable [m²]

L: Largo perforación real [m]

A: Ancho del túnel [m]

h: Hombro del túnel [m]

r: Radio techo [m]

$$V = T \times L \quad (19)$$

Donde:

V: Volumen [m³]

L: Largo perforación real [m]

T: Área de la sección del túnel [m²]

Por otro lado, el ciclo de excavación considera un largo de perforación de 4 [m], con un avance de disparo del 90%, lo que equivale a un avance efectivo de 3,6 [m] por disparo.

Tabla (Anexo B) 3. Parámetros avance perforación

	NP	NTI
Largo perforación [m]	4	4
Avance [%]	90%	90%
Largo perf real[m]	3.6	3,60
Volumen [m ³]	59	81
Superficie reforzable [m ²]	40	48

Para determinar los tiempos que tardan las actividades del ciclo, se utilizan las Ecuaciones (20) a (29) en conjunto a los datos mostrados en la (Tabla 3 Anexo B):

$$T_M = t_M \times T \quad (20)$$

Donde:

T_M : Tiempo de marcar [min]

t_M : tiempo en marcar tiros por sección de galería [min/m²]

T: Área de la sección del túnel [m²]

$$T_p = (L \times tp_1 + tp_2)Np \quad (21)$$

Donde:

T_p : Tiempo de perforación [min]

tp_1 : Minutos por metro perforado [min/m]

tp_2 : Minutos por tiro [min/un]

N_p : Numero de tiros totales [un]

$$T_c = (L \times t_{c1} + t_{c2})N_p \quad (22)$$

Donde:

T_c : Tiempo de carga de explosivos [min]

t_{c1} : Minutos por metro perforado por cargar [min/m]

t_{c2} : Minutos por tiro a cargar [min/un]

N_p : Numero de tiros totales [un]

$$T_{AR} = t_{AR} \times SR \quad (23)$$

Donde:

T_{AR} : Tiempo de acuñar y regar [min]

t_{AR} : Minutos por metro cuadrado por acuñar y regar [min/m²]

SR : Superficie reforzable [m²]

$$T_{RT} = t_{RT} \times SR \times N_{RT} \quad (24)$$

Donde:

T_{RT} : Tiempo de refuerzo transitorio [min]

t_{RT} : Minutos por unidad de refuerzo transitorio *split set* [min/un]

SR : Superficie reforzable [m²]

N_{RT} : Numero de pernos transitorios por metro cuadrado [un/m²]

$$T_{Ma} = \text{Entero sup} (t_{Ma} \times N_B / \text{Factor de llenado}) \quad (25)$$

Donde:

T_{Ma} : Tiempo en retirar la marina [min]

t_{Ma} : Minutos por baldada de mineral [min/un]

N_B : Numero de baldadas [un]

$$N_{PD} = (1/E^2) \quad (26)$$

Donde:

N_{PD} : Numero de pernos definitivos por metro cuadrado [un/m²]

E : Espaciamiento de pernos [m]

$$T_{PD} = t_{PD} \times SR \times N_{PD} \quad (27)$$

Donde:

T_{PD} : Tiempo en colocar pernos definitivos [min]

t_{PD} : Minutos en colocar pernos por unidad [min/un]

N_{PD} : Numero de pernos definitivos por metro cuadrado a reforzar[un/m²]

$$T_{MU} = t_{MU} \times SR \quad (28)$$

Donde:

T_{MU} : Tiempo de colocación de malla [min]

t_{MU} : Minutos en colocar la malla por metro cuadrado a reforzar [min/un]

$$T_{Sh} = t_{Sh} \times SR \quad (29)$$

Donde:

T_{Sh} : Tiempo de colocación de hormigón proyectado [min]

t_{Sh} : Minutos en colocar el hormigón proyectado por metro cuadrado a reforzar [min/un]

Tabla (Anexo B) 4. Valores utilizados para obtener los tiempos de actividades de excavación.

Variables utilizadas para calcular los tiempos de las actividades de excavación	NP	NTI
tm [min/m ²]	2	2
tp1 [min/m]	0,8	0,8
tp2 (cambio tiro) [min/tiro]	0,25	0,25
Np	58	72
tc1 [min/m]	0,2	0,2
tc2 [min/tiro]	0,25	0,25
tAR [min/m ²]	0,5	0,5
tRT [min/un]	2,5	2,5
NRT [un/m ²]	0,5	0,5
Vol Balde [m ³]	5,4	5,4
tM [min/baldada]	3	3
Numero de baldadas (NB) [un]	11	15
tPD [min/un]	4	4
Espaciamiento pernos definitivos [m]	1,2	1,2
NPD [un/m ²]	0,69	0,69
tmll [min/m ²]	3	3
tSH [min/m ²]	4,5	4,5

A partir de los valores de las variables utilizados para calcular los tiempos de las actividades del ciclo de excavación (Tabla 4 Anexo B) y en conjunto a las Ecuaciones (20) a (29), se obtienen los tiempos para cada operación unitaria del ciclo de excavación tanto para el nivel de producción como transporte intermedio (Tabla 5 Anexo B).

Tabla (Anexo B) 5. Tiempos de desarrollo de actividades de excavación

Tiempos actividades de excavación [min]	NP	NTI
Marcar y perforar	233	293
Cargar explosivos	61	76
Tronar y ventilar	30	30
Acuñar y regar	20	24
Refuerzo transitorio	50	60
Sacar marina	42	57
Perno definitivo	111	133
Malla	120	143
Hormigón proyectado	180	239
T. total desarrollo	846	1054
T. total desarrollo [h]	14	18

Finalmente, para facilitar la programación gráfica de las actividades de preparación de niveles, la duración de las operaciones unitarias se ha aproximado a horas para incluir las interferencias por cambio de frente, lo cual da holgura suficiente para considerar la misma duración independientemente del galibo de las galerías, tal como puede observarse en la tabla que sigue:

[h/disp.] Común para NP y NTI	
Perforar [h]	4
Cargar explosivos [h]	2
Tronar y ventilar [h]	1
Acuñar y regar [h]	1
Refuerzo transitorio [h]	1
Sacar marina [h]	2
Perno definitivo [h]	4
Malla [h]	2
Hormigón proyectado [h]	3
T. total desarrollo [h]	20

Anexo C. Recursos de flota para la producción

Equipo LHD

Para efectos de cálculo en este trabajo se ha utilizado los datos disponibles de catálogo del modelo Sandvik Toro LH517i (Figura 1 Anexo D) con balde de 8,42 [m³].



Figura (Anexo C) 1. Equipo LHD Sandvik Toro LH517i

Cuyas dimensiones se presentan en las siguientes figuras:

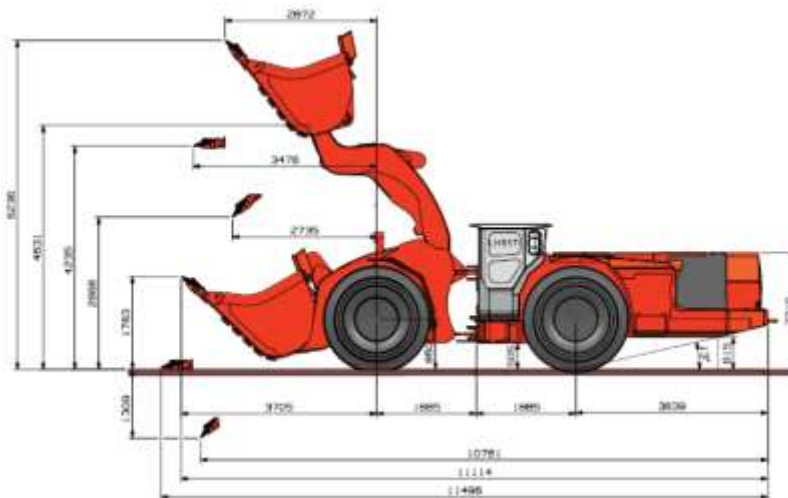


Figura (Anexo C) 2. Dimensiones del equipo LHD Sandvik Toro LH517i

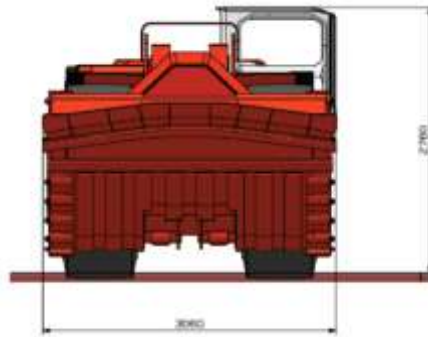


Figura (Anexo C) 3. Alto y ancho del equipo LHD Sandvik Toro LH517i

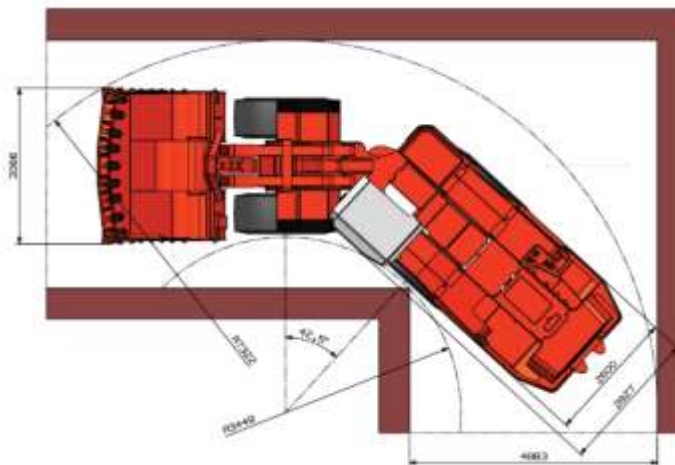


Figura (Anexo C) 4. Radios de giro equipo LHD Sandvik Toro LH517i

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas del catálogo del proveedor.

Tabla (Anexo C) 1. Especificaciones técnicas LHD Sandvik Toro LH517i

Especificaciones técnicas	
Dimensiones (Largo- Ancho- Alto) [m]	11,5 x 3,1 x 2,8
Capacidad [t]	17
Rango cucharón [yd ³]	9,2- 12
Peso (operativo) [kg]	46.500
Fuerza de arranque hidráulico- levantamiento [kg]	35.000
Fuerza de arranque hidráulico- inclinación [kg]	29.450
Potencia del motor [kW]	310
Velocidad cargado [km/h]	29

Camión de bajo perfil

Para efectos de cálculo en este trabajo se ha utilizado los datos disponibles de catálogo del modelo Sandvik TH551i (Figura 1 Anexo E) con tolva de 30 [m³].



Figura (Anexo C) 5. Camión Sandvik TH551i

En las siguientes figuras se presentan las dimensiones del equipo:

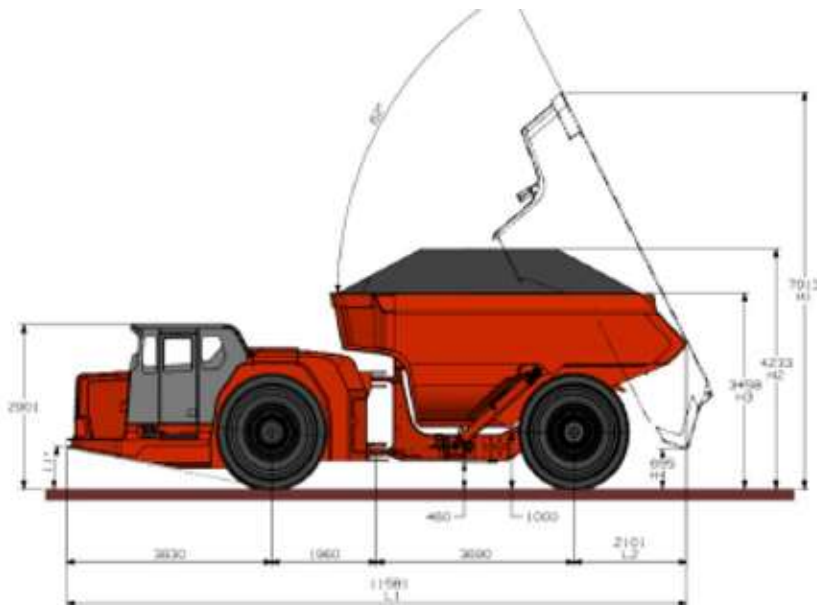


Figura (Anexo C) 6. Dimensiones Camión Sandvik TH551i

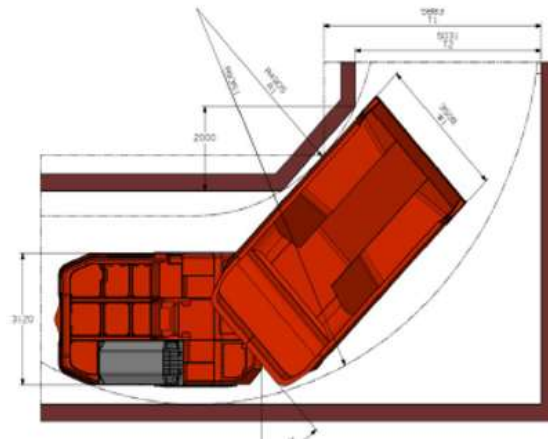


Figura (Anexo C) 7. Radios de giro Camión Sandvik TH551i

En la tabla siguiente se resumen las principales especificaciones técnicas del catálogo del equipo y las curvas de esfuerzo tractor.

Tabla (Anexo C) 2. Especificaciones técnicas Camión Sandvik TH551i

Especificaciones técnicas	
Dimensiones (Largo- Ancho- Alto) [m]	11,5 x 3,2 x 3,2
Capacidad [t]	51
Rango de caja [m ³]	24- 30
Peso (operativo) [kg]	46.870
Potencia del motor [kW]	515
Velocidad cargado [km/h]	33,4

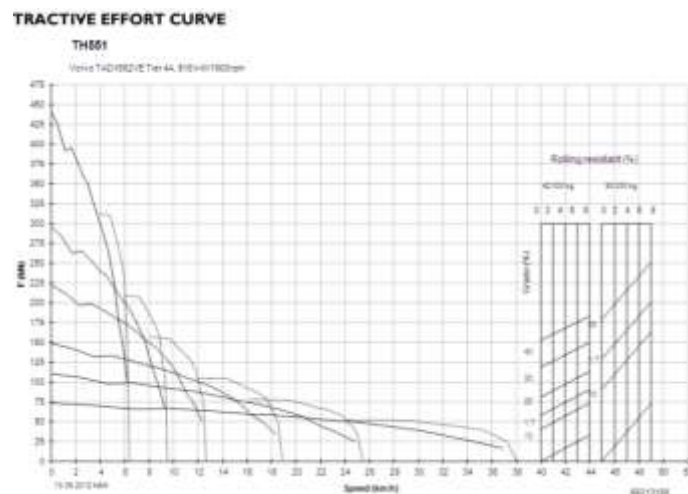


Figura (Anexo C) 8. Curva de esfuerzo camión TH551i



Dimensionamiento de flota de producción

Para el dimensionamiento de la flota de producción de los diseños, se considera la operación con los equipos antes descritos, se destaca en la Tabla 3 Anexo C, que se define para el diseño autónomo un turno con segregación temporal de 16 [h/d].

Tabla (Anexo C) 3. Consideraciones dimensionamiento de flota ambos diseños.

Datos para dimensionamiento de flota	Convencional	Autónomo
Producción diaria [t/d]	40000	40000
Capacidad LHD [m ³]	8,4	8,4
Capacidad camiones [m ³]	30	30
Densidad [t/m ³]	2,6	2,6
Relación de vacíos	0,5	0,5
Factor llenado [%]	85%	85%
Disponibilidad física [%]	80%	80%
Utilización [%]	75%	85%
Numero de turnos [un]	3	1
Horas de trabajo efectivo [h/d]	12	16

Tabla (Anexo C) 4. Distancias recorridas en el nivel de transporte intermedio de ambos diseños

Distancias [m]	Transporte Lado W		Transporte Lado E	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Vaciadero Norte	61	83	61	83
Cabecera Norte	322	322	234	234
Cabeceras W y E	580	580	665	665
Cabecera Sur	156	156	155	155
Vaciadero Sur	61	83	61	83
Total	1.180	1.224	1.176	1.220
Promedio	1.202		1.198	
Condición más exigente	Carga en estación 1-2		Carga en estación 19-20	
Equipo Vacío [m]	434		267	
Equipo Cargado [m]	823		971	

Tabla (Anexo C) 5. Distancias recorridas en el nivel de producción de ambos diseños por los LHD.

Distancias	Calle completa	Media calle
20 tramos de 16 [m]	336	168
Dist. a punto carga [m]	45	45
Dist. total, LHD	381	213

Los recursos necesarios por los diseños se obtienen a partir de las dimensiones mostradas en las Tablas 4 y 5 Anexo C, en conjunto a las relaciones matemáticas (Ecuaciones 30 a 35) de dimensionamiento de las flotas de producción:

$$C_{eq} = \frac{Vf\delta}{(1+e)} \quad (30)$$

Donde:

C_{eq} : Capacidad del balde o tolva del camión [t]

V: Volumen balde [m^3]

f: Factor de llenado [%]

δ : Densidad roca [t/m^3]

e: Relación de vacíos

$$N_c = \frac{60}{(T_1+T_2+T_3+T_4)} \quad (31)$$

Donde:

N_c : Numero de ciclos por hora [un/h]

T_1 : Tiempo de carga [min]

T_2 : Tiempo de descarga [min]

T_3 : Tiempo de viaje total [min]

T_4 : Tiempo de maniobras [min]

$$T_3 = \left(\frac{D_c}{V_c} + \frac{D_v}{V_v} \right) \times 60 \quad (32)$$

Donde:

T_3 : Tiempo de viaje total [min]

D_c : Distancia de viaje cargado [m]

D_v : Distancia de viaje descargado [m]

V_c : Velocidad de viaje cargado [m/min]

V_v : Velocidad de viaje descargado [m/min]

$$R = d u N_c C \quad (33)$$

Donde:

R: Rendimiento del equipo [t/h]

d: Disponibilidad física [%]

u: utilización [%]

N_c: Numero de ciclos [un/h]

C: Capacidad del equipo [t]

$$T_{C_1} = \text{Entero inf} \left(\frac{C_c}{C_{LHD}} \right) \times (\text{Tiempo de ciclo LHD}) \quad (34)$$

Donde:

T_{C₁}: Tiempo de carga camión

C_C: Capacidad camión [t]

C_{LHD}: Capacidad LHD [t]

Por parte de los camiones, para obtener sus velocidades cargado y descargado, se utiliza la curva de esfuerzo de tracción proporcionada por el proveedor y en base a las pendientes del diseño y considerando un factor de pendiente (Fp) de 10 [kg/t] más un factor de resistencia a la rodadura (Fr) asociado a la carpeta de rodado de asfalto de 18 [kg/t], se obtiene la pendiente efectiva (PE) con la siguiente relación donde P corresponde a la pendiente de diseño real del camino [%].

$$PE = \pm P[\%] + (Fr/Fp)[\%] \quad (35)$$

Estas pendientes efectivas son utilizadas en conjunto a la curva de esfuerzo para obtener de esta forma las velocidades cargado y descargado:

Tabla (Anexo C) 6. Parámetros para velocidades de camiones

Velocidades camiones	
Pendiente Subida [%]	2
Pendiente Bajada [%]	-2
PE. cargado	3,8
PE. descargado	-0,2
V. cargado [km/h]	33
V. descargado [km/h]	36



Con las velocidades de los camiones cargado y descargado (Tabla 6 Anexo C), más la consideración de velocidades para *LHD*, en el caso del diseño convencional con velocidades de 19 [km/h] cargado y 23 [km/h] descargado, por otra parte, el diseño autónomo considera aproximadamente 13 [km/h] cargado y 20 [Km/h] descargado, de esta forma se obtienen los siguientes resultados:

Tabla (Anexo C) 7. Dimensionamiento equipos *LHD*

Dimensionamiento <i>LHD</i>		
	Convencional	Autónomo
T1 [min]	0,5	0,5
T2 [min]	0,2	0,2
T3 [min]	0,10	0,13
T4 [min]	0,5	0,5
Velocidad cargado [m/min]	317	222
Velocidad descargado [m/min]	383	333
Dist. cargado [m]	25	25
Dist. vacío [m]	25	25
Ciclos <i>LHD</i>	45	43
Rendimiento <i>LHD</i> [t/h]	332	365
Rendimiento diario [t/d]	3.985	5.832
Numero de <i>LHD</i> [un]	11	7

Tabla (Anexo C) 8. Dimensionamiento por sector para camiones

	Convencional		Autónomo	
	Transporte W	Transporte E	Transporte W	Transporte E
Número de baldadas [un]	3	3	3	3
Carga efectiva camión [t]	37,2	37,2	37,2	37,2
TC1 [min]	4	4	4,2	4,2
TC2 [min]	0,5	0,5	0,5	0,5
TC3 [min]	2,2	2,2	2,2	2,2
TC4 [min]	0,5	0,5	0,5	0,5
Ciclos camión [1/h]	8,3	8,3	8,15	8,15
Rendimiento Camión [t/h]	185	185	206	206
Rendimiento diario [t/d]	2.222	2.222	3.298	3.298
Numero de camiones [un]	10		6	

Anexo D. Planificación preparación minera

Definidos los tiempos de las actividades del ciclo de excavación, sumado al supuesto de 16 [h/d] de trabajo autónomo, se realiza una planificación de las actividades para obtener el rendimiento [m/año] para verificar el cumplimiento de los requerimientos de preparación horizontal para un turno con operación manual de 8 [h/d]. Esto se realiza para diferentes tipos de configuraciones de cuadrillas y frentes variando entre 1 - 3 cuadrillas trabajando en 1 - 3 frentes. Obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 1 Anexo D

Tabla (Anexo D) 1. Rendimientos de configuraciones para el turno de 8 [h/d] para equipos manuales

Horas del turno [h/d]	8	
Calles/Frentes	Avance [m/año]	Rendimiento [m/día]
3C/3F	3.780	10,5
3C/2F	2.520	7,0
3C/1F	1.260	3,5
2C/3F	2.520	7,0
2C/2F	1.680	4,7
2C/1F	840	2,3
1C/3F	1.260	3,5
1C/2F	840	2,3
1C/1F	420	1,2

Anexo E. Planificación minera

La planificación minera en este estudio se evalúa para tres actividades principales, producción, construcción y excavación. A continuación, se detallan las cubicaciones utilizadas para obtener la vida útil de los módulos y los tiempos de construcción y excavación.

Producción

Tabla (Anexo E) 1. Cubicación tonelaje de los módulos de operación del diseño autónomo

Cubicación módulos de operación	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Distancia calle 1 [m]	168	152	120
Distancia calle 2 [m]	168	152	104
Distancia en las zanjas [m]	640	576	560
Distancia total [m]	976	880	896
Área unitaria del módulo [m ²]	9.307	8.421	8.421
Tonelaje columnas 230 [m] en [t]	5.565.706	5.035.638	5.035.638
Tonelaje columnas 350 [m] en [t]	8.469.552	7.662.928	7.662.928

Tabla (Anexo E) 2. Tiempos para finalizar la operación en módulos del diseño autónomo

Tiempos para finalizar los módulos	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Vida útil columnas de 350 [m] en [días]	1.452	1.314	1.314
Vida útil columnas de 230 [m] en [días]	954	863	863
Vida útil columnas de 350 [m] en [años]	4,0	3,6	2,7
Vida útil columnas de 230 [m] en [años]	2,7	2,4	1,8

Construcción y Excavación

Tabla (Anexo E) 3. Cubicaciones módulos de operación para excavación y construcción

Cubicación módulos de operación	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
Calle 1 [m]	336	336	256
Calle 2 [m]	336	304	224
Zanjas [m]	1.280	1.136	832
Distancia total [m]	1.954	1.776	1.312
Punto de extracción [un]	80	72	52
Metros cúbicos por pavimentar [m ³]	907	864	648

Tabla (Anexo E) 4. Duración de las actividades de excavación y construcción

Duración de actividades [años]	M. 1-16	M. 17-18	M. 19-20
T. avance 3C/3F	0,50	0,46	0,34
Una cuadrilla	2,9	2,6	1,9
Termino construcción	1,5	1,3	0,9



Anexo F. Evaluación de costos

Tabla (Anexo F) 1. Cubicaciones y costos de preparación diseño convencional

Costos preparación de diseño convencional				
	unidades	Total obra	Costo unitario [US\$/un]	Costo total [US\$]
Nivel de Producción				
Desarrollo CP 4,5 x 4,1 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 24.005.754
Desarrollo calle de producción	m	6.720	\$ 2.838	\$ 19.068.867
Malla bizcocho 100x100x6 CP	m ²	67.145	\$ 12	\$ 821.087
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m CP	un	104.914	\$ 32	\$ 3.355.690
Hormigón proyectado CP	m	6.720	\$ 54	\$ 360.156
Cañería agua 2" CP	m	6.720	\$ 60	\$ 399.954
Desarrollo galería zanja 4,5 x 4,1 con malla y perno 2,4	m			\$ 42.265.622
Desarrollo galería zanja	m	12.032	\$ 2.838	\$ 34.142.352
Malla bizcocho 100x100x6 GZ	m ²	120.222	\$ 12	\$ 1.470.137
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m GZ	un	187.846	\$ 32	\$ 6.008.283
Hormigón proyectado GZ	m	12.032	\$ 54	\$ 644.850
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,1 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 7.007.462
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,1	m	1.958	\$ 2.838	\$ 5.556.078
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	19.564	\$ 12	\$ 239.239
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	30.569	\$ 32	\$ 977.744
Hormigón proyectado Cabeceras	m	1.958	\$ 54	\$ 104.938
Cañería agua 4" Cabeceras	m	1.958	\$ 66	\$ 129.463
Desquinche malla	m ³	21.896	\$ 87	\$ 1.909.764
Fortificación intersección con cables	un	400	\$ 1.961	\$ 784.278
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras	m ³	8.678	\$ 640	\$ 5.553.680
Suministro y construcción punto de extracción	un	764	\$ 21.593	\$ 16.497.004
Frontones	m	40	\$ 2.838	\$ 113.505
Taller de mantenimiento				\$ 2.448.989
Nave Dumper	m	54	\$ 3.143	\$ 169.703
Nave Jumbo	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Nave LHD avc	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Nave LHD	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Distancia lineal accesos	m	579	\$ 3.143	\$ 1.819.590
Barrio cívico				\$ 1.627.889
Distancia lineal barrio cívico	m	518	\$ 3.143	\$ 1.627.889
Nivel de transporte intermedio				
Desarrollo cabecera 5,5 x 5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 9.396.351
Desarrollo cabecera NTI	m	2.346	\$ 3.143	\$ 7.372.641
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	28.018	\$ 12	\$ 342.618
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	43.778	\$ 32	\$ 1.400.242
Hormigón proyectado Cabeceras	m	2.346	\$ 54	\$ 125.733
Cañería agua 4" Cabeceras	m	2.346	\$ 66	\$ 155.117
Desarrollo sector de descarga norte y sur con malla, perno 2,4m y shotcrete	m			\$ 3.077.584
Desarrollo sectores de descarga	m	734	\$ 3.143	\$ 2.306.700
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	8.766	\$ 12	\$ 107.196
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	13.697	\$ 32	\$ 438.098
Hormigón proyectado Cabeceras	m	734	\$ 54	\$ 39.338
Desquinche y fortificación buzón NTI	un	4	\$ 35.678	\$ 142.714
Excavación Zona de Buzones de Carguío	m ³	864	\$ 42	\$ 36.497
Fortificación Buzón Carguío con Pernos L= 3,5 m	un	20	\$ 352	\$ 7.041
Desarrollo sector de carga con malla, perno 2,4m y shotcrete				\$ 6.223.849
Desarrollo sector carga NTI	m	1.580	\$ 3.143	\$ 4.965.376
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	18.870	\$ 12	\$ 230.749
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	29.484	\$ 32	\$ 943.044
Hormigón proyectado Cabeceras	m	1.580	\$ 54	\$ 84.679
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras	m ³	4.660	\$ 640	\$ 2.982.271



Tabla (Anexo F) 2. Cubicaciones y costos de preparación diseño autónomo

Costos preparación de diseño autónomo				
	unidades	Total obra	Costo unitario [US\$/un]	Costo total [US\$]
Nivel de Producción				
Desarrollo CP 4,5 x 4,1 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 24.005.754
Desarrollo calle de producción	m	6.720	\$ 2.838	\$ 19.068.867
Malla bizcocho 100x100x6 CP	m ²	67.145	\$ 12	\$ 821.087
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m CP	un	104.914	\$ 32	\$ 3.355.690
Hormigón proyectado CP	m	6.720	\$ 54	\$ 360.156
Cañería agua 2" CP	m	6.720	\$ 60	\$ 399.954
Desarrollo galería zanja 4,5 x 4,1 con malla y perno 2,4	m			\$ 42.665.899
Desarrollo calle de producción	m	12.032	\$ 2.838	\$ 34.142.352
Malla bizcocho 100x100x6 CP	m ²	120.222	\$ 12	\$ 1.470.137
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m CP	un	187.846	\$ 32	\$ 6.008.283
Suministro y Montaje de Portón Metálico	un	32	\$ 12.509	\$ 400.276
Hormigón proyectado GZ	m	12.032	\$ 54	\$ 644.850
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,1 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 7.007.462
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,1	m	1.958	\$ 2.838	\$ 5.556.078
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	19.564	\$ 12	\$ 239.239
Pernos 22 mm Acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	30.569	\$ 32	\$ 977.744
Hormigón proyectado Cabeceras	m	1.958	\$ 54	\$ 104.938
Cañería agua 4" Cabeceras	m	1.958	\$ 66	\$ 129.463
Desquínche malla	m ³	21.896	\$ 87	\$ 1.909.764
Fortificación interseccion con cables	un	400	\$ 1.961	\$ 784.278
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras	m ³	8.678	\$ 640	\$ 5.553.680
Suministro y construcción punto de extracción	un	764	\$ 21.593	\$ 16.497.004
Frontones	m	40	\$ 2.838	\$ 113.505
Taller de mantención				\$ 4.751.286
Nave Dumper	m	54	\$ 3.143	\$ 169.703
Nave Jumbo	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Nave LHD avc	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Nave LHD	m	54	\$ 2.838	\$ 153.232
Acceso norte	m	150	\$ 3.143	\$ 471.396
Taller mantención Autónomo	m	395	\$ 3.143	\$ 1.241.344
Taller mantención manual	m	395	\$ 2.838	\$ 1.120.863
Acceso taller de mantención manual	m	454	\$ 2.838	\$ 1.288.284
Barrio cívico				\$ 1.627.889
Distancia lineal barrio cívico	m	518	\$ 3.143	\$ 1.627.889
Zona de Transición				\$ 1.492.755
Distancia lineal Z.T	m	475	\$ 3.143	\$ 1.492.755
Nivel de transporte intermedio				
Desarrollo cabecera 5,5 x 5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas de agua, comunicaciones y energía	m			\$ 9.396.351
Desarrollo cabecera NTI	m	2.346	\$ 3.143	\$ 7.372.641
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	28.018	\$ 12	\$ 342.618
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	43.778	\$ 32	\$ 1.400.242
Hormigón proyectado Cabeceras	m	2.346	\$ 54	\$ 125.733
Cañería agua 4" Cabeceras	m	2.346	\$ 66	\$ 155.117
Desarrollo sector de descarga norte y sur con malla, perno 2,4m y shotcrete	m			\$ 3.077.584
Desarrollo sectores de descarga	m	734	\$ 3.143	\$ 2.306.700
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	8.766	\$ 12	\$ 107.196
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	13.697	\$ 32	\$ 438.098
Hormigón proyectado Cabeceras	m	734	\$ 54	\$ 39.338
Desquínche y fortificación buzón NTI	un	4	\$ 35.678	\$ 142.714
Excavación Zona de Buzones de Carguío	m ³	864	\$ 42	\$ 36.497
Fortificación Buzón Carguío con Pernos L= 3,5 m	un	20	\$ 352	\$ 7.041
Desarrollo sector de carga con malla, perno 2,4m y shotcrete				\$ 6.223.849
Desarrollo sector carga NTI	m	1.580	\$ 3.143	\$ 4.965.376
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m ²	18.870	\$ 12	\$ 230.749
Pernos 22 mm acero A44-28H lechado L=2,4 m Cabeceras	un	29.484	\$ 32	\$ 943.044
Hormigón proyectado Cabeceras	m	1.580	\$ 54	\$ 84.679
Pavimento H-35 con fibra calles y cabeceras	m ³	4.660	\$ 640	\$ 2.982.271



Tabla (Anexo F) 3. Costos de adquisición y operación de equipos

Proveedores	Manual	Autónomo
Sandvik	\$ 985.458	\$ 1.705.686
Epiroc	\$ 1.067.001	\$ 1.795.838
CAT	\$ 1.102.669	\$ 1.939.262
promedio	\$ 1.051.709	\$ 1.813.595

Tabla (Anexo F) 4. Costos de adquisición de equipos desglosado

Adquisición de equipos	Manual	Autónomo
Costo LHD [US\$]	\$1.504.975	\$1.504.975
Habilitar sistema autónomo LHD [US\$]	\$ -	\$ 908.718
Habilitar sistema autónomo calles [US\$]	\$ -	\$ 164.831
Costo de adquisición total LHD [US\$]	\$1.504.975	\$2.578.524
Costo de adquisición total camiones [US\$]	\$2.483.209	\$3.923.230

Tabla (Anexo F) 5. Costos de operación equipos manuales y autónomos

Costos de operación	Manual	Autónomo
Mano de obra [US\$/t]	\$ 0,24	\$ 0,08
Combustibles [US\$/t]	\$ 0,09	\$ 0,08
Mantenimiento y reparación [US\$/t]	\$ 0,60	\$ 0,54
Licencia <i>Automine</i> [US\$/t]	\$ -	\$ 0,18
Suministros [US\$/t]	\$ 0,10	\$ 0,10
Costos de operación LHD[US\$/t]	\$ 1,03	\$ 0,97
Costos de operación NTI [US\$/t]	\$ 0,33	\$ 0,32

Fuente: (PMCHS, 2012).



Tabla (Anexo F) 6. VAC de costos diseño convencional v/s autónomo

IC, SC/FA	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
CAPEX												
Construcción	\$ 35.342.547	\$ 1.525.978	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Adquisición equipos	\$ 41.589.047	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 39.010.523	\$ -	\$ -
OPEX												
Construcción y excavación	\$ -	\$ 2.188.065	\$ 17.504.520	\$ 19.692.585	\$ 13.128.390	\$ 17.504.520	\$ 6.564.195	\$ 8.752.260	\$ 10.940.325	\$ -	\$ -	\$ -
Mano de obra [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 313.399	\$ 1.044.665	\$ 1.096.898	\$ 1.096.898	\$ 1.096.898	\$ 1.096.898	\$ 1.096.898	\$ 940.198	\$ 313.399
Combustibles [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 316.557	\$ 1.055.191	\$ 1.107.951	\$ 1.107.951	\$ 1.107.951	\$ 1.107.951	\$ 1.107.951	\$ 949.672	\$ 316.557
Mantenimiento y reparación [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.201.839	\$ 7.339.463	\$ 7.706.436	\$ 7.706.436	\$ 7.706.436	\$ 7.706.436	\$ 7.706.436	\$ 6.605.517	\$ 2.201.839
Licencia Automata [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 751.873	\$ 2.506.244	\$ 2.631.557	\$ 2.631.557	\$ 2.631.557	\$ 2.631.557	\$ 2.631.557	\$ 2.255.620	\$ 751.873
Suministros [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 427.536	\$ 1.425.119	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.282.607	\$ 427.536
Costos de operación [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4.011.205	\$ 13.370.683	\$ 14.039.217	\$ 14.039.217	\$ 14.039.217	\$ 14.039.217	\$ 14.039.217	\$ 12.033.615	\$ 4.011.205
Transporte intermedio [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.303.406	\$ 4.344.686	\$ 4.561.920	\$ 4.561.920	\$ 4.561.920	\$ 4.561.920	\$ 4.561.920	\$ 3.910.217	\$ 1.303.406
Flujo de costos [US\$]	\$ 76.931.594	\$ 2.188.065	\$ 17.504.520	\$ 25.007.196	\$ 30.843.759	\$ 36.105.657	\$ 25.165.332	\$ 27.353.397	\$ 68.551.985	\$ 18.601.137	\$ 15.943.832	\$ 5.314.611
Flujo de costos descontado [US\$]	\$ 76.931.594	\$ 2.025.986	\$ 15.007.305	\$ 19.851.518	\$ 22.671.084	\$ 24.572.904	\$ 15.858.428	\$ 15.960.445	\$ 37.036.505	\$ 9.305.200	\$ 7.385.079	\$ 2.279.345
Convencional												
CAPEX												
Construcción	\$ 32.877.900	\$ 1.525.978	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Adquisición equipos	\$ 41.386.818	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 43.870.027	\$ -	\$ -
OPEX												
Construcción y excavación	\$ -	\$ 2.188.065	\$ 17.504.520	\$ 19.692.585	\$ 13.128.390	\$ 17.504.520	\$ 6.564.195	\$ 8.752.260	\$ 10.940.325	\$ -	\$ -	\$ -
Mano de obra [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 971.538	\$ 3.238.461	\$ 3.400.384	\$ 3.400.384	\$ 3.400.384	\$ 3.400.384	\$ 3.400.384	\$ 2.914.615	\$ 971.538
Combustibles [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 358.716	\$ 1.195.720	\$ 1.255.506	\$ 1.255.506	\$ 1.255.506	\$ 1.255.506	\$ 1.255.506	\$ 1.076.148	\$ 358.716
Mantenimiento y reparación [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.476.759	\$ 8.255.664	\$ 8.668.657	\$ 8.668.657	\$ 8.668.657	\$ 8.668.657	\$ 8.668.657	\$ 7.430.278	\$ 2.476.759
Licencia Automata [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Suministros [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 427.536	\$ 1.425.119	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.496.375	\$ 1.282.607	\$ 427.536
Costos de operación [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4.234.549	\$ 14.115.164	\$ 14.820.922	\$ 14.820.922	\$ 14.820.922	\$ 14.820.922	\$ 14.820.922	\$ 12.703.648	\$ 4.234.549
Transporte intermedio [US\$]	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.376.016	\$ 4.586.720	\$ 4.816.056	\$ 4.816.056	\$ 4.816.056	\$ 4.816.056	\$ 4.816.056	\$ 4.128.048	\$ 1.376.016
Flujo de costos [US\$]	\$ 74.264.719	\$ 2.188.065	\$ 17.504.520	\$ 25.303.151	\$ 31.830.274	\$ 37.141.499	\$ 26.201.174	\$ 28.389.239	\$ 74.447.831	\$ 19.636.978	\$ 16.831.696	\$ 5.610.565
Flujo de costos descontado [US\$]	\$ 74.264.719	\$ 2.025.986	\$ 15.007.305	\$ 20.086.457	\$ 23.396.202	\$ 25.277.880	\$ 16.511.184	\$ 16.564.848	\$ 40.221.576	\$ 9.823.378	\$ 7.796.332	\$ 2.406.275



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA