UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO - CHILE

“IMPLICANCIAS DE LA MIGRACIÓN A ELECTROMOVILIDAD MEDIANTE EL USO DE BATERÍAS DE LITIO EN LA INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS E INSTALACIONES AUXILIARES DE MINAS SUBTERRANEAS DE HUNDIMIENTO”

AUTOR

JUAN ANDRÉS NAVARRETE JEREZ

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

PROFESORES GUÍAS

VICTOR ENCINA MONTENEGRO

OCTUBRE, 2022

Agradecimientos

Mi viaje universitario ha sido largo, he conocido a muchas personas, me hice amigo de unos pocos y continúo hablando con muchos menos, es por esto que, a quienes de verdad debo agradecer es a Rocío Catalina Lobos Ríos, por haberme acompañado en todo el proceso y siempre estar a mi lado cuando más la he necesitado, a mis padres por haberme dado una excelente educación y por haberme guiado hacia este camino, a mis suegros, por darme ánimos y por permitir que me centrara en los estudios y en mi formación académica, y además, a mis compañeros Fernando Moscoso y Matías Oyarzo, que fueron un gran apoyo en la universidad y que hasta el día de hoy me apoyan y me dan oportunidades.

Finalmente me gustaría agradecer a mis profesores, en especial al profesor Víctor Encina, que me tuvo mucha paciencia en el transcurso de este trabajo.

Resumen

En las operaciones de minería subterránea, el uso de cargadores y camiones articulados de bajo perfil son prácticamente un estándar de diseño, siendo en la actualidad los equipos diésel los que dominan el mercado, pese a que desde la década de los 60, se ha intentado introducir equipos eléctricos debido a su menor impacto ambiental y mayor confort para operadores.

La preferencia generalizada de uso de equipos diésel sobre sus competidores eléctricos se debe principalmente a su menor costo de adquisición y mayor flexibilidad de desplazamiento en interior mina. El desplazamiento de equipos eléctricos está severamente limitado a las zonas de la mina en que existe una red física de energía eléctrica donde conectarse mediante carretes de cable o troles.

La reciente tecnología de accionamiento eléctrico usando baterías de litio incorporada a los equipos de carguío y transporte subterráneos, ha permitido eliminar las limitaciones de flexibilidad de desplazamiento de los antiguos equipos eléctricos manteniendo sus ventajas.

En el presente trabajo de titulación se analiza el efecto de introducir equipos de carguío y transporte subterráneo accionados por baterías de litio, en vez de equipos con accionamiento diésel, respecto de los requerimientos de instalaciones auxiliares para la operación, de energía de ventilación y de costos de adquisición y mantención.

Abstract

In underground mining operations, the use of loaders and low-profile articulated trucks are practically a design standard, with diesel equipment currently dominating the market, despite the fact that since the 1960s, attempts have been made to introduce electrical equipment due to its lower environmental impact and greater comfort for operators.

The general preference for the use of diesel equipment over its electric conductors is mainly due to its lower acquisition cost and greater flexibility of movement inside the mine. The movement of electrical equipment is severely limited to the areas of the mine where there is a physical network of electrical energy where they are connected by means of cable reels or trolleys.

The recent electric drive technology using lithium batteries incorporated into underground loading and transport equipment has made it possible to eliminate the displacement flexibility limitations of the old electric equipment while maintaining its advantages.

In the present titling work, the effect of introducing underground transport and loading equipment powered by lithium batteries, instead of diesel-powered equipment, is analyzed with respect to the requirements of auxiliary installations for the operation, ventilation energy and costs. acquisition and maintenance.

Glosario

LHD: de sus siglas en ingles Load Haul Dump, es el equipo que traslada el mineral desde el punto de extracción hasta el pique de traspaso

Camión articulado: Es tipo de camión que tiene bajo perfil, está diseñado para trabajar en túneles y traslada el mineral desde el pique de traspaso hasta la planta o hasta otra zona de acarreo de mineral.

Nivel de Producción: Conjunto de infraestructura asociada a la extracción del mineral de la mina subterránea, por acá circulan los equipos LHD.

Nivel de Transporte: Conjunto de infraestructura asociada al traslado del mineral desde el pique de traspaso hasta la planta o hasta la salida de la mina.

Nivel de Ventilación: Conjunto de infraestructura asociada a la ventilación de la mina, por acá circula el aire limpio y el viciado o contaminado. Por este nivel no circula personal.

Diésel: Combustible fósil que utilizan los motores diésel, al ser utilizado genera CO2 y otros gases contaminantes.

Baterías de Ion-Litio: Tipo de baterías que utilizan el ion litio para generar energía.

EMD: Equipos con motor diésel

EBL: Equipos eléctricos con baterías de Litio

Índice

Agradecimientos 1
Resumen 2
Abstract 3
Glosario 4
Índice 5
Índice de Tablas 7
Índice de Figuras 7
Introducción 8
Objetivos y alcances 9
Objetivo general 9
Objetivos específicos 9
Alcances 9
1. Antecedentes generales 10
1.1. Método de explotación 10
1.2. Equipos mineros para el método de hundimiento 10
1.3. Equipos diésel 11
1.4. Equipos eléctricos 11
1.4.1. Equipos eléctricos con baterías 13
1.4.2. Infraestructura utilizada 13
2. Caso de estudio 14
2.1. Diseño de la mina 14
2.2. Diseño de ventilación 18
2.3. Requerimiento de ventilación 20
2.3.1. Parámetros de ventilación 20
2.3.2. Requerimiento de equipos 21
2.3.3. Requerimiento de personal 23
2.3.4. Uso de energía en ventilación 23
2.4. Requerimiento de equipos 24
2.4.1. Horas operativas de equipos 24

2.4.2. Consumo de combustible de equipos 25
2.4.3. Consumo de energía de equipos 26
2.5. Evaluación económica 26
2.5.1. Evaluación de instalaciones requeridas 26
2.5.2. Evaluación del requisito de ventilación 29
2.5.3. Evaluación de equipos utilizados y su energía 29
3. Análisis y Discusión 32
4. Conclusiones 35
5. Bibliografía 36
Anexos 38
1. Circuito de ventilación considerado para el cálculo de pérdida de presión 38
2. Perdida de Presión caso EMD 39
3. Perdida de Presión caso EBL 40

Índice de Tablas

Tabla 1 Cubicación de túneles del nivel de producción y transporte en ambos casos propuestos. 17
Tabla 2 Cubicación de túneles del nivel de ventilación en ambos casos propuestos. 20
Tabla 3 Factores y criterios de ventilación. 20
Tabla 4 Factores y criterios para potencia de ventiladores. 21
Tabla 5 Caudal requerido por equipos en caso EMD 22
Tabla 6 Caudal requerido por equipos en caso EBL 22
Tabla 7 Caudal requerido por equipos en ambos casos 23
Tabla 8 Potencia de los ventiladores para ambos casos 24
Tabla 9 Horas operativas para ambos casos 25
Tabla 10 Consumo promedio de equipos para caso EMD 25
Tabla 11 Costos de desarrollos de túneles 27
Tabla 12 Costo total de infraestructura para ambos casos 28
Tabla 13 Costo de la energía de los ventiladores 29
Tabla 14 Costos de adquisición de equipos 30
Tabla 15 Consumo unitario de equipos para ambos casos 31

Índice de Figuras

Figura 1 Distribución de calles y zanjas. 14
Figura 2 Diseño de los túneles del nivel de producción. 15
Figura 3 Diseño de los túneles del nivel de transporte intermedio. 15
Figura 4 Diseño del nivel de producción y de transporte para ambos casos propuestos 16
Figura 5 Diseño de los túneles del nivel de ventilación. 18
Figura 6 Diseño del nivel de ventilación para los dos casos propuestos 19

Introducción

La minería ha evolucionado a lo largo de la historia gracias a las nuevas tecnologías que ha desarrollado la humanidad. El uso de equipos diésel revolucionó la industria, aumentando considerablemente la producción de las mineras de la época. Con el tiempo, las comunidades vieron como el cambio climático afectaba a todo el planeta y se desarrollaron los equipos eléctricos que buscaban mitigar el aporte que generaba la minería a este cambio climático.

Si bien los equipos eléctricos tenían desventajas como el alto costo de adquisición y la poca operatividad debido a los cables, esta tecnología no se desechó y el área de innovación de las empresas siguió buscando la forma de hacerlas rentables para el mercado.

La nueva tecnología que busca revolucionar la industria minera son los equipos eléctricos con baterías de litio, estos equipos eliminan las desventajas de sus versiones anteriores, como el uso de cables, y además quitan las desventajas del uso de equipos diésel, como la generación de calor, ruido y lo más importante, los gases producidos por esos equipos.

En esta memoria de titulación se busca realizar una comparación entre las tecnologías de equipos diésel y equipos eléctricos a baterías de litio. Para realizar esto se analizarán tres aspectos: la infraestructura, que comprende el laboreo de la mina y las instalaciones necesarias para la operación de esos equipos; el sistema de ventilación y los equipos de carguío y transporte propiamente tales. En todos ellos se analizarán los costos de construcción o adquisición y los costos de operación.

Para ello se presentarán los respectivos diseños de niveles de extracción y transporte para una operación genérica de explotación por hundimiento a razón de 30 ktpd.

Objetivos y alcances

Objetivo general

- Evaluar técnica y económicamente las implicancias de la migración a equipos electro móviles a batería de litio en minería subterránea de hundimiento.

Objetivos específicos

- Diseñar la infraestructura de una minera subterránea de hundimiento apta para los equipos eléctricos a batería.

- Calcular los costos y beneficios de la migración de equipos diésel a equipos eléctricos a batería.

- Comparar técnicamente los requisitos en el diseño de equipos diésel y de equipos eléctricos a batería.

- Dimensionar el sistema de ventilación correspondiente al escenario de operación con uno u otro tipo de equipo

- Estimar las diferencias de costos de capital y operación de infraestructura, equipos y ventilación.

- Determinar otras ventajas o desventajas no económicas de ambas soluciones tecnológicas

Alcances

El presente trabajo es una investigación a nivel de ingeniería de perfil, que consiste en un estudio de comparación, de los aspectos distintivos de las soluciones de diseño minero para minas explotadas por el método de hundimiento usando equipos convencionales diésel o la alternativa de equipos eléctricos a batería.

1. Antecedentes generales

En esta sección se presentarán el contexto en que se desarrolla la presente investigación.

1.1. Método de explotación

En minería el recurso económico representa aquella fracción del yacimiento minero que se puede extraer obteniendo un beneficio económico. Y el método de explotación es la forma en que se va a extraer dicho recurso. Este puede ser a tajo abierto o mediante métodos subterráneos. (Hamrin, 2001)

Algo común que poseen todos los métodos subterráneos es el desarrollo de túneles, la fortificación de estos y las conexiones e instalaciones auxiliares necesarias para asegurar la operación. Además, hay que instalar otros servicios, como electricidad, ventilación, agua y alguna infraestructura crucial para el mantenimiento. (Jäderblom, 2017)

En esta investigación se utilizará el método de explotación subterráneo de Block Caving (que en castellano denominamos método de hundimiento) para mostrar la diferencia en el diseño y disposición general de la mina para un escenario usando equipo diésel convencional y otro para uso de equipos a batería.

1.2. Equipos mineros para el método de hundimiento

Los equipos generalmente son diseñados para altos niveles de producción. El equipo de desarrollo debería ser tan mecanizado como el diseño de la mina lo permita. Los jumbos de perforación pueden ser con múltiples brazos y además se debe utilizar un equipo que extraiga la marina, el que, de igual manera, debería ser lo más grande que permita el túnel. Los equipos LHD se seleccionan según el tonelaje diario que se quiere cumplir en la mina y dado que estos no son adecuados para viajes largos, se suelen combinar con camiones de bajo perfil, u otro medio de transporte, agregando a veces, chancadoras subterráneas. (Tobie & Julin, 1998)

En las minas explotadas por hundimiento, se utilizan camiones de bajo perfil y vehículos LHD. Los LHD recogen el mineral de los puntos de extracción y lo transportan a puntos de descarga ubicados a cortas distancias, dejando las distancias mayores para los camiones de

bajo perfil. (Nieto et al., 2020). El principal combustible utilizado en estos equipos es el diésel. (Jäderblom, 2017)

1.3. Equipos diésel

La naturaleza del trabajo que realizan los camiones y los LHD hace que los motores diésel en estos sean realmente versátiles. Ofrecen un rango casi ilimitado de funcionamiento, una alta cantidad de energía especifica (energía por masa de material de almacenamiento de energía), una relación entre potencia y peso bruto del vehículo ventajosa, un costo capital relativamente bajo, una fácil y rápida recarga de combustible, etc. (Paraszczak et al., 2014)

Estos equipos requieren una infraestructura en el interior de la mina dedicada al abastecimiento de combustible, la que, según el guía metodológica de seguridad minera[1], "deberá estar diseñado de tal forma que permita el abastecimiento seguro a los equipos, posean sistemas de control de derrames, posean sistemas efectivos de control de incendio y que el humo y gases puedan ser evacuados sin afectar las operaciones mineras, además de cumplir con las disposiciones establecidas en el D.S. N°160/2008".

1.4. Equipos eléctricos

Los equipos eléctricos se han utilizado durante los últimos años en distintas operaciones (Zablocki, 2020):

- En la década de 1960, las palas eléctricas eran utilizadas y dado que no eran flexibles para transportar, lentamente fueron reemplazadas por cargadores neumáticos

- En la década de 1970, se desarrollaron los cargadores continuos, los que hasta la actualidad se utilizan en el desarrollo de túneles civiles.

[1] Sernageomin (2016). Guía metodológica de seguridad minera: autorización del abastecimiento, almacenamiento y distribución de combustible líquido diésel en minas subterráneas.

- En la década de 1970, se comenzó a utilizar los LHD's remotos, ya que la crisis energética aumentó el interés por los equipos eléctricos. Estos se usaban, principalmente, en minas profundas y vetas angostas.

- En la década de 1980, los cargadores eléctricos se desarrollaron, los que juntos con taladros electrohidráulicos eran utilizados para minas de gran altitud y profundidad, sin embargo, el uso de neumáticos reemplazó los rieles.

- En la década de 1980, se comenzó a promover los equipos eléctricos como los LHD's con cables y los camiones con trole, pero no es hasta ahora que, gracias a la evolución de las baterías, se aceleró la electrificación en las minas subterráneas.

- En la década de 1980, muchas empresas quisieron desarrollar camiones eléctricos, sin embargo, la demanda no fue suficiente para cubrir los costos de desarrollo.

- En el caso de los LHD's con cables, el personal, la inversión y los costos operacionales eran mayores, además de su poca flexibilidad produjeron que las minas no estuvieran dispuestas a cambiar en la filosofía de planificación (Zablocki,2020)

La razón para cambiar a equipos eléctricos no ha cambiado: menos ventilación, mejor visibilidad y mejor ambiente de trabajo. Para lograr esto, uno de los mayores avances tecnológicos han sido los motores eléctricos, que han pasado de corriente continua a corriente alterna, resultando en una menor mantención y mayor confiabilidad. Otra de las razones para cambiar a equipos eléctricos está relacionado con la profundidad de las minas, dado que se debe evaluar si es más económico el cambio a equipos eléctricos o el costo de desarrollar los túneles de ventilación y toda la infraestructura relacionada con la ventilación. (Zablocki,2020)

Hay cinco categorías principales de equipos eléctricos, dependiendo de la forma en que la energía eléctrica se entrega a los motores (Paraszczak et al., 2014):

- Desde un paquete de baterías a bordo del equipo

- Desde un cable de poder umbilical
- Desde un trole en el techo
- Usando una transmisión eléctrica hibrida
- Desde celdas de combustible

1.4.1. Equipos eléctricos con baterías

Los avances en la tecnología de las baterías de ion-Litio han logrado que tengan la suficiente energía y densidad de poder para hacer que los vehículos mineros eléctricos alimentados por baterías no solo sean factibles, sino que económicamente ventajosos. En la minería subterránea, el principal beneficio proviene de la reducción en los costos de ventilación. (Hoque et al., 2020)

1.4.2. Infraestructura utilizada

Cuando se diseña la mina para una flota de equipos eléctricos o híbridos, se debe añadir infraestructura que será requerida para mantener y operar la flota de vehículos a baterías. La primera consideración es la relacionada con el método de recarga de baterías, debido a que supone un impacto en el diseño. (Burke & Serediak, 2018)

Igual que para equipos diésel, se requiere mantener la existencia de talleres para reparación de baldes, para el cambio de ruedas, mantenimiento del sistema hidráulico y otros servicios comunes a todos los cargadores y otros equipos mineros.

2. Caso de estudio

El caso de estudio es un proyecto de mina subterránea explotada por el método de hundimiento. En esta faena se quiere explotar a un ritmo máximo de 30 ktpd y a una tasa de hundimiento del orden de 20.000 $m^2/año$.

A continuación, se presentan dos propuestas diseñadas para el mismo proyecto, una de ellas considera el uso de equipos con motor diésel (EMD), mientras que la otra propone el uso de equipos con baterías de litio (EBL).

Para estudiar la migración desde equipos diésel a equipos impulsados por baterías de litio, se analizan tres aspectos principales de la decisión de diseño minero. El primero corresponde específicamente al diseño de la mina, particularmente los niveles de extracción, transporte y ventilación, incluyendo en ellos las instalaciones de apoyo para la operación. El segundo se refiere a los requisitos de ventilación y finalmente el tercero corresponde a los equipos propiamente tales.

2.1. Diseño de la mina

El proyecto cuenta con 24 calles en un diseño rómbico de 17 x 20 m, con las calles en orientación N60°O y las zanjas con orientación NS (Ver Figura 1).

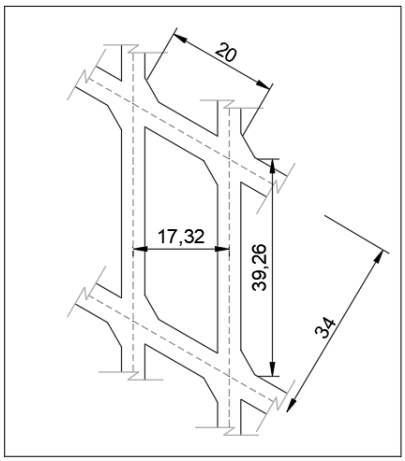


Figura 1 Distribución de calles y zanjas.

Las calles se consideran de 5,1 m x 4,3 m, las zanjas son de 4,2 m x 4,1 m y los accesos son de 5,2 m x 5,1 m, tal como se muestra en la Figura 2

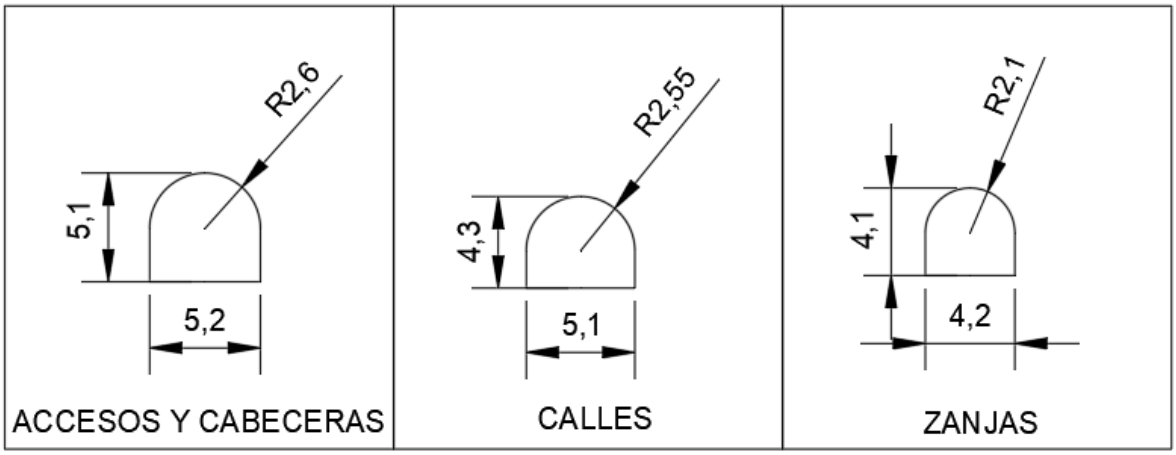


Figura 2 Diseño de los túneles del nivel de producción.

Para transportar el mineral hacia el punto de destino, se utiliza un nivel de transporte intermedio por donde circularán los camiones. Las calles de este nivel tienen un diseño de 5,7 m x 5,6 m, tal como se observa en Figura 3.

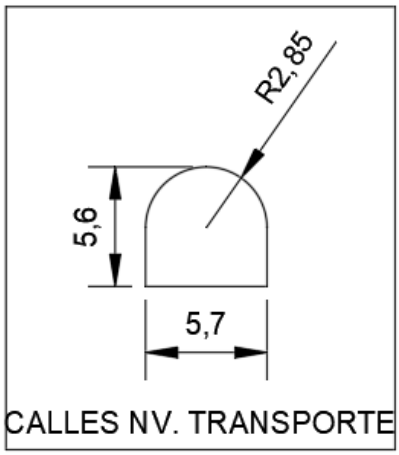


Figura 3 Diseño de los túneles del nivel de transporte intermedio.

Este nivel de transporte se encuentra ubicado a una cota 4 m inferior a la del nivel de producción, con el fin de que los cargadores frontales puedan descargar directo en el camión.

En la Figura 4 se muestran los dos diseños propuestos, a la izquierda se encuentra el caso EMD, mientras que a la derecha se encuentra el caso EBL.

En el caso de EMD, la infraestructura de abastecimiento del combustible se encuentra en el taller interior mina, en la que se considera una caverna de 10 m x 10 m, con todas las disposiciones de seguridad requeridas según el D.S. 160/2008.

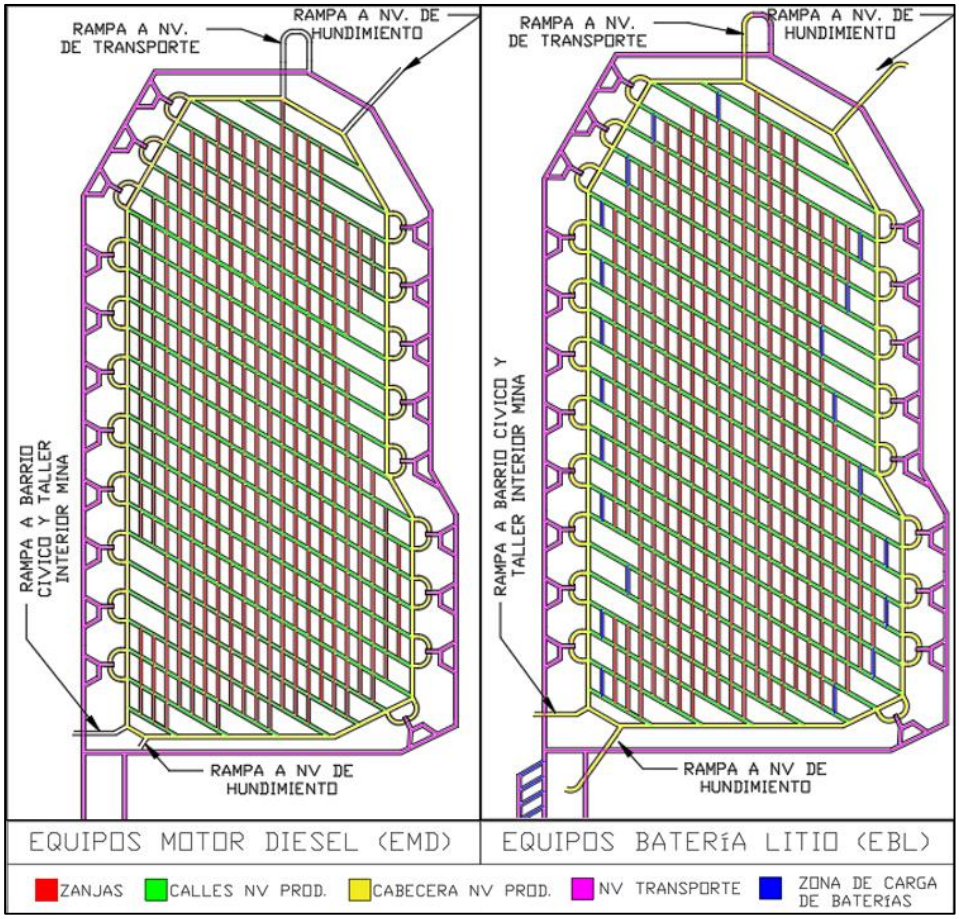


Figura 4 Diseño del nivel de producción y de transporte para ambos casos propuestos

Se puede observar que el diseño utilizado en EBL requiere más desarrollo de túneles, debido a la utilización de una galería extra para recargar los equipos. Esto provoca que el nivel de transporte intermedio tenga una extensión mayor.

En base a estos diseños se calculan los metros requeridos para cada tipo de labor en cada uno de estos casos. (Ver la Tabla 1)

Tabla 1 Cubicación de túneles del nivel de producción y transporte en ambos casos propuestos.

			Diseño EMD		Diseño EBL		Diferencia (EMD – EBL)	
Tipo de labor	Diseño	Área m^2	Desarrollo m	Volumen m^3	Desarrollo m	Volumen m^3	Desarrollo m	%
Cabecera o acceso	5,2x5,1	24	4.401	105.624	4.462	107.088	- 61	- 1
Calle	5,1x4,3	19	8.917	169.423	9.551	181.469	- 634	- 7
Zanja	4,2x4,1	15	13.852	207.780	13.852	207.780	0	-
Circuito transporte	5,7x5,6	28	5.055	141.540	5.435	152.180	- 380	- 8
Zonas de recarga NP	4,2x4,1	15	-	-	823	12.345	- 823	-
Zonas de recarga NTI	5,7x5,6	28	-	-	235	6.580	- 235	-
Abastecimiento de combustible	6,0x5,0	30	20	600	-	-	20	-
TOTAL			32.225	624.367	34.358	667.442	- 2.113	- 3

Se puede observar en la Tabla 1 que circuito de transporte requiere un 8% menos de desarrollos en el caso de EMD, mientras que la construcción necesaria en la cabecera solo es un 1% menor en el caso de EMD. Se observa también que los desarrollos de zanjas se mantienen, dado que las reservas que se busca extraer son las mismas. Finalmente, la diferencia en los diseños corresponde a 2.113 m de desarrollos, siendo mayor el requerimiento de desarrollos en el caso de EBL.

2.2. Diseño de ventilación

El diseño de ventilación considerado para el caso EMD busca eliminar los gases emitidos por este tipo de equipos, lo que genera una renovación en el aire y además una corriente de aire en el interior mina. En el caso EBL, el diseño sólo se busca crear una corriente de aire para el personal y para arrastre del polvo generado en los puntos de extracción, debido a que no hay generación de gases.

En consecuencia, el diseño para equipos diésel considera dos subniveles de ventilación, uno destinado a la inyección y otro destinado a la extracción del aire contaminado. Por otra parte, en el diseño EBL, debido a que no se generan gases tóxicos, se requiere menos caudal de aire, y por lo tanto menos infraestructura, existiendo la opción de reutilizar la cabecera del nivel de hundimiento para realizar la extracción del aire. Con esto se logra disminuir la cantidad de desarrollos para ventilación realizados.

Las galerías de ventilación se diseñan de 7,2 m x 7,1 m tal como se muestra en la Figura 5.

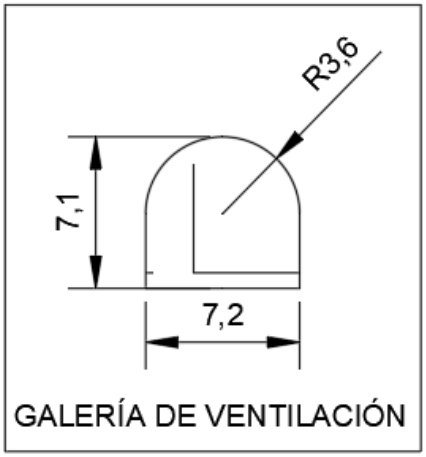


Figura 5 Diseño de los túneles del nivel de ventilación.

En la Figura 8 se muestran ambos diseños, en donde destaca en el caso de EMD, una cabecera y dos galerías de inyección, además de una galería de extracción principal, mientras que en el caso EBL, se aprecia solamente una galería de extracción principal, dado que la inyección

se realizará por la cabecera del nivel de hundimiento, lo que le da una nueva utilidad a este nivel y disminuye costos de desarrollo de túneles. En la Tabla 2, se presentan los metros de desarrollo de túneles de ambos casos.

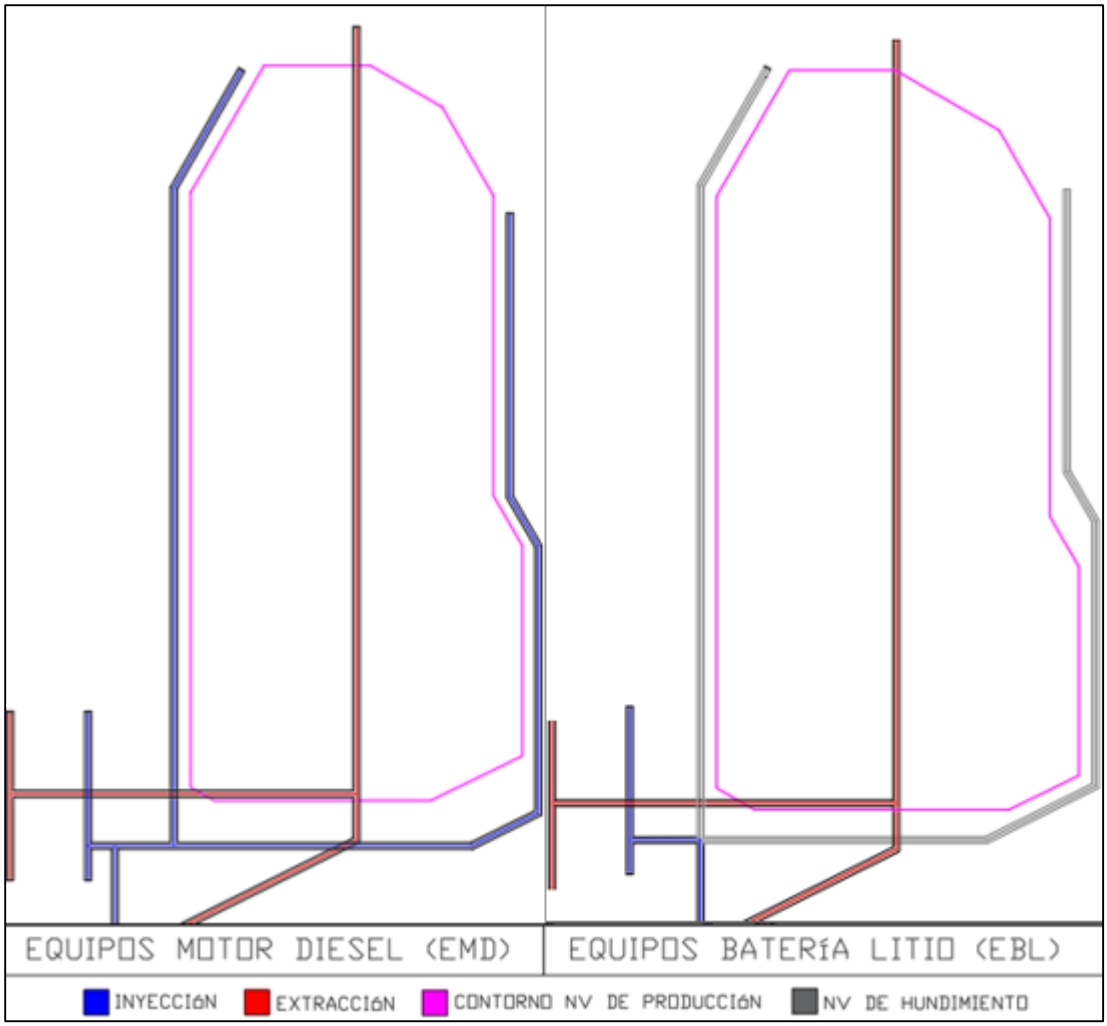


Figura 6 Diseño del nivel de ventilación para los dos casos propuestos

Tabla 2 Cubicación de túneles del nivel de ventilación en ambos casos propuestos.

			Diseño para EMD		Diseño para EBL		Diferencia (EMD – EBL)	
Tipo de labor	Diseño	Área m^2	Desarrollo m	Volumen m^3	Desarrollo m	Volumen m^3	Desarrollo m	%
Inyección	7,2x7,1	46	2.877	132.323	847	38.972	2.030	71%
Extracción	7,2x7,1	46	2.116	97.323	2.116	97.331	0	0%
TOTAL			4.993	229.646	2.963	136.303	2030	41%

De la Tabla 2 se puede observar que los metros requeridos en el caso EMD es de 4.993 m, mientras que en el caso EBL se requieren 2.963 m, lo que representa una reducción del 41 % en los desarrollos necesarios para el nivel de ventilación.

2.3. Requerimiento de ventilación

2.3.1. Parámetros de ventilación

Para el cálculo de caudal requerido se consideran los factores que se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3 Factores y criterios de ventilación.

Ítem	VALOR	UNIDAD
Requerimiento equipos diésel (por HP del motor)	2,83	m^3/min
Requerimiento para arrastre de polvo (velocidad del aire)	0,5	m/s

Asimismo, en la Tabla 4, se presentan los parámetros para el cálculo de resistencia y potencia de los ventiladores.

Tabla 4 Factores y criterios para potencia de ventiladores.

Ítem	VALOR	UNIDAD
Factor fricción galerías	0,0093	kg/m^3
Factor fricción chimeneas	0,0056	kg/m^3
Rendimiento motor	90	%
Rendimiento ventilador	89	%

2.3.2. Requerimiento de equipos

Para esta expansión se consideran 11 equipos LHD de 12 t y 10 camiones de 44 t en etapa de producción.

Para calcular el requerimiento de los equipos, en el caso EMD, se utiliza la fórmula propuesta por la entidad fiscalizadora con respecto al caudal requerido por un equipo diésel, tal que:

Ecuación 1 Caudal requerido por un equipo con motor diésel.

$$Q_{equipo} = HP_{motor} * 2{,}83 \left(\frac{m^3}{\frac{min}{HP}} \right) * Factor \text{ de simultaneidad } (\%)$$

Aplicando la Ecuación 1 para cada uno de los equipos analizados se obtiene la Tabla 5, en donde se presentan la potencia de los motores, la utilización y cantidad de equipos y su caudal.

Tabla 5 Caudal requerido por equipos en caso EMD

Equipo	Motor diésel HP	Factor de simultaneidad %	Cantidad de equipos u	Caudal unitario m^3/min	Caudal m^3/min
LHD de 12 t	335	75	11	711	7.821
CAMIONES de 44 t	535	75	10	1136	11.355
TOTAL					19.177

Sin embargo, en el caso EBL, el cálculo es distinto, debido a que no se emiten gases contaminantes, por lo que en este caso solamente se regirá por el caudal mínimo requerido para que exista una velocidad de 30 m/min, tal como informa la entidad fiscalizadora[2]. Es así como en la Tabla 6 se muestran los resultados del caudal requerido por equipo, considerando la velocidad mínima del aire.

Tabla 6 Caudal requerido por equipos en caso EBL

Equipo	Diseño	Área $[m^2]$	Factor de simultaneidad %	Cantidad de equipos u	Caudal unitario m^3/min	Caudal m^3/min
LHD de 12 t	5,1X4,3	19	75	11	570	4.703
Camiones de 44 t	5,2X5,1	24	75	10	720	5.400
TOTAL						10.103

En la Tabla 7 se muestra una comparativa entre el requerimiento de caudal de los equipos, tanto LHD como camiones.

[2] La entidad fiscalizadora no posee un inciso específico para los equipos eléctricos a batería de litio, sin embargo, la restricción utilizada es según el Art. N° 138 D.S. N° 72 la velocidad promedio en los lugares de trabajo no debe ser inferior a los treinta metros por minuto (0,5 m/seg) (30 m/min)

Tabla 7 Caudal requerido por equipos en ambos casos

EQUIPO	Cantidad de equipos	Caudal caso EMD	Caudal caso EBL	Diferencia (EMD – EBL)	
	u	m^3/min	m^3/min	m^3/min	%
LHD de 12 t	11	7.821	4.703	3.118	40
Camiones de 44 t	10	11.355	5.400	5.955	52
	Total	19.177	10.103	9.074	47

De la Tabla 7 se puede observar que el requerimiento de ventilación por los equipos disminuye en un 47% del necesario en el caso EMD.

2.3.3. Requerimiento de personal

El requerimiento de ventilación para el personal es igual para ambos casos, debido a que el personal requerido es el mismo.

2.3.4. Uso de energía en ventilación

La energía utilizada por el ventilador está relacionada con la potencia del ventilador. Por ende, se puede utilizar la Ecuación 2, que permite obtener la potencia del ventilador, en base a la perdida de presión (H) y al caudal (Q). Para este cálculo se considera el circuito de ventilación más largo que existiera en la mina, tal como se puede observar en el Anexo 1. Aplicando esta fórmula se obtiene la Tabla 8, en donde se aprecia la potencia de los ventiladores necesarios para ambos casos.

En el Anexo 2 y en el Anexo 3, se puede observar los datos considerados para el cálculo de la perdida de presión total en cada uno de los casos analizados.

Ecuación 2 Potencia del ventilador

$$P = \frac{H * Q}{\eta_{motor} * \eta_{ventilador} * 1000}$$

Tabla 8 Potencia de los ventiladores para ambos casos

	Unidades	EMD	EBL
Perdida de presión	Pa	535	264
Caudal	m^3/min	19.177	10.103
Potencia	kW	301	105

En la Tabla 8 se puede apreciar una diferencia de 196 kW entre ambos casos, lo que significa una diferencia del 65% entre el caso EMD y EBL.

2.4. Requerimiento de equipos

El siguiente de los ámbitos a analizar es el uso de los equipos. Para esto se utilizarán las horas operativas, lo que nos permitirá obtener una aproximación al uso de energía que utilizará cada equipo en sus turnos mediante el consumo de combustible o electricidad por hora que posean.

2.4.1. Horas operativas de equipos

Las horas operativas de los equipos son 12 h, distribuidos en 3 turnos diarios[3], sin embargo, en el trabajo de Prudencio y Pino del 2021[4], se puede observar que la utilización de los equipos a batería representa aproximadamente un 10% de incremento en las horas operativas de estos equipos en comparación con su contraparte diésel, lo que provoca que las horas operativas para el caso EBL sea de 13,2 h. Esto se puede observar en la Tabla 9 que resume lo mencionado.

[3] Horas operativas de equipos fueron extraídos de "Diseño para operación con equipos autónomos en explotaciones mineras por hundimiento de bloques o paneles" por Felipe Reyes Valenzuela.
[4] Extraído de "Propuesta de uso de equipo LHD a batería como alternativa competitiva frente al equipo diésel en el proceso de limpieza de labores subterráneas horizontales en una operación minera mecanizada" por Prudencio y Pino en 2021

Tabla 9 Horas operativas para ambos casos

	Caso EMD	Caso EBL
Horas operativas h	12	13,2

2.4.2. Consumo de combustible de equipos

El consumo de combustible para equipos LHD está en el orden de los 25 L/h cuando la distancia de acarreo es corta (25 a 100 m, además de condiciones favorables para la recolección del material), 30 L/h cuando la distancia de acarreo es media (100 a 200 m, además condiciones de traslado de material intermitente con densidad media) y 40 L/h cuando la distancia de acarreo es larga (200 a 300 m con condiciones de traslado de materiales continuas, con dificultad para excavar y altas pendientes en caminos).[5]

Realizando el mismo análisis para los camiones, se obtiene que gastan en promedio 40 L/h para el primer caso, 50 L/h para el segundo caso y finalmente 60 L/h para el último caso.[6]

Considerando lo anterior, y dado que el caso de estudio considera galerías planas, con poca pendiente, se utilizará el caso intermedio, tal como se observa en la Tabla 10

Tabla 10 Consumo promedio de equipos para caso EMD

Equipo	Consumo promedio L/h
LHD de 12 t	30
Camiones de 44 t	50

[5] Información extraída de CATERPILLAR PERFORMANCE HANDBOOK Edition 48 del 2018, para un equipo LHD R1700G que posee una capacidad de balde y una potencia de motor similares a los utilizados en este informe.

[6] Información extraída de CATERPILLAR PERFORMANCE HANDBOOK Edition 48 del 2018, para un camión articulado AD45 que posee una capacidad de balde y una potencia de motor similares a los utilizados en este informe.

2.4.3. Consumo de energía de equipos

El consumo de energía de los equipos a batería está dado por el consumo que tiene el cargador de las baterías y el tiempo que este estará funcionando. En este sentido el consumo promedio del cargador es de 60 kWh[7]. Si bien los equipos funcionarán 13,2 h diarias, el cargador solamente funcionará cuando se realice el cambio de la batería. En el caso de los camiones, el cambio de batería se realiza cada 10 ciclos, si en un turno completa 14 ciclos[8], en un día realiza aproximadamente 3 cambios de batería. Las baterías para los camiones requieren aproximadamente 2 h para cargar al 90% la batería[9].

Por otra parte, los LHD requieren un cambio de batería cada 4 a 4,5 h[10], y debido a que el tiempo de operación de los equipos es de 13,2 h, se realizan 3 cambios de batería diarios. Las baterías para los LHD requieren aproximadamente 50 min para cargar al 90% la batería[11].

2.5. Evaluación económica

Las diferencias observadas entre ambos casos muestran un mayor desarrollo de túneles para el caso EBL, un mayor consumo de energía en ventilación para el caso EMD y un consumo en diferentes unidades para los equipos, es por esto que se expresarán todas estas comparativas en dólares ($) para poder evaluar la diferencia en la misma unidad de medida.

2.5.1. Evaluación de instalaciones requeridas

El primer aspecto analizado fue la infraestructura analizada, dentro de este parámetro se encuentran los túneles utilizados y las zonas para abastecer combustible (en el caso EMD) y para cargar baterías (en el caso EBL).

---

[7] Información extraída de Ríos P., & Roy G., & Carhuancho P., & Jesus D. (2021). Propuesta de uso de equipo LHD a batería como alternativa competitiva frente al equipo diésel en el proceso de limpieza de labores subterráneas horizontales en una operación minera mecanizada

[8] Información extraída de Hoque A., & Rennie R., & Larsen J., & Bauman J. (2020). Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines.

[9] Información extraída de especificaciones técnicas en Epiroc. (2017). Minetruck MT42 Battery

[10] Información extraída de Ríos P., & Roy G., & Carhuancho P., & Jesus D. (2021). Propuesta de uso de equipo LHD a batería como alternativa competitiva frente al equipo diésel en el proceso de limpieza de labores subterráneas horizontales en una operación minera mecanizada

[11] Información extraída de especificaciones técnicas en Epiroc. (2017). Scooptram ST14 Battery

Para poder calcular el costo del desarrollo de túneles, se utiliza el trabajo de Núñez, 2021, en donde evalúa el costo de diferentes tamaños de túneles para condiciones similares a las de esta investigación. En la Tabla 11 se puede observar los metros de desarrollo para cada nivel y el costo que tiene cada una de las secciones evaluadas.

Tabla 11 Costos de desarrollos de túneles

			EMD		EBL		Diferencia (EMD-EBL)
Sector	Sección	Valor $\$/m$	Desarrollo m	Costo $	Desarrollo m	Costo $	$
Nivel de producción	5,2 x 5,1	5.129	4.401	22.574.187	4.462	22.887.076	-312.889
	5,1 x 4,3	4.242	8.917	37.822.012	9.551	40.511.162	-2.689.151
	4,2 x 4,1	3.331	13.852	46.135.248	14.675	48.876.318	-2.741.071
	6,0 x 5,0	5.802	20	116.048	-	-	116.048
Nivel de transporte	5,7 x 5,6	6.174	5.055	31.208.383	5.670	35.005.249	-3.796.866
Nivel de ventilación	7,2 x 7,1	9.887	4.993	49.367.330	2.963	29.296.094	20.071.236

Por otra parte, las zonas para abastecer combustible pueden evaluarse de dos formas, comprándolas a los proveedores de combustibles o arrendarlas a estos mismos. Para el primero de estos casos, una bomba aérea de 70 m^3, posee un costo aproximado de $157.500, lo que no considera la obra civil asociada[12] ni la mantención mensual que se le debe realizar, que es aproximadamente de $2.100 mensuales. En el caso de arrendar la bomba aérea, se debe considerar $13.650 mensuales, lo que tampoco considera la obra civil ni la mantención mensual[13]. Cabe destacar que por la cantidad de equipos y la capacidad de la bomba se requieren 2 bombas para abastecer la mina por 1 semana, además estos costos son para una

[12] La obra civil asociada se considera como un 20% del costo de adquisición de la bomba.
[13] Información proveniente de Holding minero CEMIN, compañía de mediana minería de cobre y oro en Chile.

bomba en superficie, lo que aumenta el tiempo de desplazamiento a la zona de carga de combustible de los equipos.

Las zonas de carga y cambio de baterías, por su parte, consideran una estación de carga de baterías a $20.825, una estación de cambio de baterías a $12.288, una grúa para el cambio de las baterías a $22.500 y finalmente los cargadores de baterías a $120.000 cada uno.[14] Es importante mencionar, que en el diseño realizado se considera una zona de carga y cambio de batería por cada dos calles donde trabaje un LHD, lo que considera un total de 11 cargadores para estos equipos y 4 cargadores para los camiones, lo que muestra un total de 15 zonas de carga. Esto implica que los equipos no tienen un desplazamiento extra al normal para realizar su cambio de batería, lo que implica un mayor tiempo de producción.

En la Tabla 12 se puede observar una comparación del costo de infraestructuras para cada uno de los casos.

Tabla 12 Costo total de infraestructura para ambos casos

Infraestructura	Unidad	Caso EMD	Caso EBL	Diferencia (EMD-EBL)
Túneles	$	187.223.208	176.575.900	10.647.308
Bomba de combustible	$	598.500	-	598.500
Zonas de carga	$	-	2.634.195	2.634.195
Total en infraestructura	$	187.821.708	179.210.095	8.611.613

Se puede observar que el costo en infraestructuras para utilizar EBL es cercano a $8.6 millones de dólares más económico que el caso convencional con EMD. Esto representa una reducción del 5% en la inversión en este ámbito.

[14] Información extraída de Hoque A., & Rennie R., & Larsen J., & Bauman J. (2020). Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines.

2.5.2. Evaluación del requisito de ventilación

La ventilación es otro de los aspectos en los que se centró esta investigación, por tanto, es de gran relevancia conocer el precio que posee la energía en Chile. En el informe de Sociedad contractual minera el Abra del 2020, se puede extraer que el costo promedio de la energía es de 0,08 $\$/kWh$, por tanto, en la Tabla 13 se puede observar una comparativa del costo de energía consumida por los ventiladores en ambos casos.

Tabla 13 Costo de la energía de los ventiladores

	Unidad	Caso EMD	Caso EBL	Diferencia EMD-EBL
Potencia ventilador	kWh	301	105	-
Costo anual	$\$/año$	208.051	72.576	135.475

Se puede observar que al utilizar EBL se disminuye en un 65% el gasto anual en ventilación.

2.5.3. Evaluación de equipos utilizados y su energía

El último tópico analizado fue la energía utilizada por los equipos, y el costo que posee su adquisición.

Para la adquisición de equipos, se cotizó en dos empresas el precio de equipos diésel de un tonelaje similar, el primer equipo fue cotizado en $665.000[15], mientras que el segundo se cotizo en $710.000[16]. El costo promedio para el equipo LHD es de $687.500.

Por otra parte, la adquisición de baterías tiene un costo de $86.640 para baterías de 228 kWh, mientras que las baterías de 348 kWh, tienen un costo de $115.140, cada una.[17]

[15] Cotización realizada a Sandvik Group por equipo LHD LH410, de 10 toneladas.
[16] Cotización realizada a Epiroc Chile S.A.C. por equipo LHD ST1030, de 10 toneladas (el precio incluye flete de $40.000).
[17] Información extraída de Hoque A., & Rennie R., & Larsen J., & Bauman J. (2020). Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines.

Dado que no fue posible conseguir una cotización para los EBL, se realizó una interpolación del precio. En el informe de Ríos et al, del 2021, se pueden comparar los precios de dos equipos, uno diésel y otro con baterías de litio, mostrando que el EBL representa un 132% del costo de uno diésel. Por tanto, si usamos el precio promedio del equipo LHD diésel, el costo de un LHD a baterías de Litio es de $909.907 aproximadamente.

El costo de adquisición para los camiones es aproximadamente de $816.000[18] cada camión diésel de 44 t, y el de los EBL se considera de igual manera como un 132% del costo de uno diésel, lo que otorga un valor de $1.077.120.

En la Tabla 14 se puede observar un resumen del costo de adquisición de los equipos.

Tabla 14 Costos de adquisición de equipos

		Caso EMD		CASO EBL		Diferencia
	Unidad	Costo unitario	Costo total	Costo unitario	Costo total	(EMD-EBL)
LHD de 12 t	$	687.500	7.562.500	909.907	10.008.977	-2.446.477
Camiones de 44 t	$	816.000	8.160.000	1.077.120	10.771.200	-2.611.200
Baterías de 228 kWh	$	-	-	86.640	1.906.080	-1.906.080
Baterías de 348 kWh	$	-	-	115.140	2.302.800	-2.302.800
Total	$	-	15.722.500	-	24.989.057	-9.266.557

[18] Cotización realizada a Xingye Machinery por un Camión minero articulado para minería subterránea XYUK-40, de 40 toneladas

En cuanto a la energía utilizada por los equipos, se pudo observar que los EMD tienen su consumo en L/h, teniendo en cuenta que el diésel tiene un costo de 1,03 $\$/L$[19] en Perú y 0,77 $\$/L$[20] en Chile, se considerará el promedio entre ambas de 0,9 $\$/L$

En el caso del precio de la energía, se utiliza el proveniente del informe de Sociedad contractual minera el Abra del 2020, de 0,08 $\$/kWh$.

En la Tabla 15 se muestra un resumen del consumo de energía de los equipos.

Tabla 15 Consumo unitario de equipos para ambos casos

	CASO EMD			CASO EBL		
	Consumo de combustible	Costo de combustible	Gasto anual de combustible	Consumo de energía	Costo de energía	Gasto anual de energía
	L/h	$\$/h$	$\$/año$	kWh	$\$/h$	$\$/año$
LHD de 12 t	30	27	116.640	60	5	55.906
Camiones de 44 t	50	45	194.400	60	5	111.063
Total	-	72	311.040	-	10	166.969

[19] Información extraída de Ríos P., & Roy G., & Carhuancho P., & Jesus D. (2021). Propuesta de uso de equipo LHD a batería como alternativa competitiva frente al equipo diésel en el proceso de limpieza de labores subterráneas horizontales en una operación minera mecanizada

[20] Información proveniente de Holding minero CEMIN, compañía de mediana minería de cobre y oro en Chile, en donde tienen precio preferencial del diésel de $740 pesos chilenos sin IVA. Este precio se conversa con el proveedor, en este caso Copec SA.

3. Análisis y Discusión

El estudio de casos se basó en tres ejes principales, infraestructura, ventilación y equipos.

La infraestructura de la mina mantuvo el diseño de galerías y túneles en ambos casos, sin embargo, se agregaron zonas de cargas de baterías en el caso EBL, lo que implica tener que construir 2.113 m de túneles extra que en EMD, sin embargo, al reutilizar el nivel de hundimiento y reducir el desarrollo de túneles requerido para el circuito de ventilación, se observe un incremento menor a 100 metros de desarrollo de túneles. Esto representa una reducción de $8,6 millones de dólares en la inversión. Otra de las consecuencias de la implementación es el aumento en el tiempo de construcción del diseño, que, si bien no se analizó en este informe, es una variable para considerar al momento del plan de desarrollo y producción.

En el caso de la infraestructura esencial para la producción, como lo es las zonas de carga de las baterías y la bomba de carga de combustible, se observó que la bomba aérea es $2 millones de dólares más económica, pero al estar en superficie, representa un aumento en el tiempo de traslado de los equipos, lo que disminuye sus horas efectivas de trabajo. Por el contrario, la infraestructura de carga del caso EBL es casi cinco veces más cara que la necesaria para EMD, pero al estar en el principio de cada calle de producción, disminuye el tiempo de traslado a la zona de carga, provocando que aumente sus horas efectivas de trabajo.

En cuanto a la ventilación de la mina, se observó que el caso EBL no requiere la ventilación de los gases (solo el arrastre de polvo), pero debido a las leyes actuales, se exige una velocidad mínima en las zonas de trabajo, lo que provoca que el caudal requerido sea un 47% menor en este caso.

Pese a esto, la diferencia en la potencia de los ventiladores requeridos es de un 65%, lo que representa un ahorro al usar EBL de $135.475 anuales.

En cuanto a los equipos se observó que los EBL representan una inversión un 32% de mayor valor, lo que representa cerca de $5 millones de dólares extras al compararlo con el caso

EMD, además al incluir el valor de las baterías, el costo se incrementa cerca de $4 millones de dólares más.

Sin embargo, la utilización de los EBL muestra un aumento de 1,2 horas efectivas diarias, que, si bien no se estudió en este informe, representa un aumento en la producción diaria de estos equipos. Queda considerar que esta utilización es extraída de otro caso y por tanto puede ser aún mayor debido al análisis de la distancia a la zona de cargado de baterías visto anteriormente.

Uno de los aspectos más destacados, es el consumo de los equipos, se muestra una diferencia significativa en dólares por hora, siendo aproximadamente 35 $/h para EMD, y 5 $/h para los EBL, sumando a esta diferencia la cantidad de horas operativas, debido a que el consumo de EMD considera precisamente los equipos, mientras que el consumo de EBL considera el cargador de la batería, que, debido al tiempo de carga, solo consume 6 horas en el caso de los camiones y 3 horas en el caso de los LHD.

Como se puede observar en el análisis una de las mayores debilidades del caso EBL es el costo de adquisición de equipos y el costo de la infraestructura asociada. Sin embargo, empresas como Sandvik Group, están buscando soluciones a estas deficiencias en estos equipos y su línea de equipos con baterías de litio poseen un sistema de "Autoswap"[21] (Auto-cambio), que disminuyen de 15 a 5 minutos en promedio el cambio de baterías y quitan la necesidad de una zona de cambio de batería, provocando que el equipo pueda cambiar la batería en cualquier lugar y luego depositarla cerca de una zona de carga. Además, poseen una línea de equipos llamados "Mobile Charging Station"[22], que corresponde a un equipo que puede cargar las baterías de los otros solamente anclándose a la red eléctrica mientras carga. Todo esto impactaría en la evaluación, reduciendo los costes de infraestructuras extras y cambiando la inversión de $2,5 millones de dólares de zonas de carga, en la adquisición de "Mobile Charging Station".

[21] Extraído de Sandvik. (2021). SANDVIK LH518B BATTERY ELECTRIC LOADER y de Sandvik. (2021). SANDVIK TH550B BATTERY ELECTRIC TRUCK
[22] Extraído de Sandvik. (2022). LOAD AND HAUL MOBILE CHARGING STATION

Otra de las debilidades del caso EBL es el uso de baterías, debido a lo contaminación que representan una vez terminada su vida útil. Sin embargo, existen tres opciones para las baterías que cumplen su ciclo[23]. La primera opción es transportarlas a un depósito de baterías, que está regulado por la ley de cada país el método de transporte y depósito de estas. La segunda opción es reciclarlas, en donde una empresa especializada en esto reutiliza los componentes de la batería para armar nuevos sistemas, como nuevas baterías u otras formas de almacenamientos. La última opción es la reutilización de las baterías por otras empresas, debido a que las baterías que cumplen su ciclo de vida mantienen cerca del 70-80% de su capacidad de almacenamiento de energía, unos ejemplos son el uso como sistemas estabilizadores de redes eléctricas y como sistemas de almacenamiento fotovoltaico residenciales.

Por otra parte, la gran fortaleza del caso EBL es su disminución en el gasto operacional, debido a que disminuye el consumo de energía de los ventiladores y además disminuye gasto de energía requerida por los equipos. Junto con esto, se incluye su aumento en la utilización, lo que conlleva un aumento a la producción diaria.

[23] Extraído de Burke J., & Serediak N. (2018). GMG Recommended Practices for Battery Electric Vehicles in Underground Mining

4. Conclusiones

Los equipos con motor diésel han estado en la industria de la minería desde hace décadas y si bien han surgido variantes como los equipos eléctricos o híbridos, estos no han convencido a la mayoría de las minas, las que siguen utilizando equipos diésel. Sin embargo, los equipos eléctricos con baterías de litio han revolucionado el mercado mejorando los problemas de la mayoría de los equipos eléctricos y presentando una solución al gran impacto al medio ambiente que tienen los equipos diésel.

En este informe se logró diseñar una infraestructura para una minera subterránea de hundimiento, que sea apta con el uso de equipos eléctricos a baterías. Si bien se mostró que económicamente presenta un incremento en la inversión del 3%, también se mostraron tecnologías alternativas que disminuyen esta inversión y se adaptan a un diseño para equipos diésel.

También se calcularon los costos y beneficios de la migración de equipos diésel a equipos eléctricos a batería de Litio, presentando un incremento en la inversión cercana a $3 millones de dólares, pero también mostrando una reducción en el costo operacional de $1,5 millones de dólares anuales, que representa un 44% menos de costo operacional, entre el ahorro generado por los aspectos de ventilación y de consumo de energía en los equipos.

Por otra parte, se logró comparar técnicamente los requisitos en el diseño de equipos diésel y equipos eléctricos a batería, mostrando una diferenciación en la forma de abastecer la energía a ambos equipos (uno usando una bomba y el otro utilizando zonas de carga de baterías), además de una diferencia en el propósito de la ventilación en la mina (siendo utilizada para eliminar gases en el primer caso y para mantener una circulación de aire en el segundo).

En general, se cumplió el objetivo de evaluar técnica y económicamente las implicancias de la migración a equipos electro móviles a batería de Litio en minería subterránea de hundimiento, mediante los ejes de la infraestructura, la ventilación y el uso de equipos.

5. Bibliografía

- AIGUASOL. (2021). Reporte Energía en Minería Pirometalurgia, Proyecto Eficiencia Energética en Minería.

- AKASOL. (2017). AKASYSTEM 15 AKM.

- Burke J., & Serediak N. (2018). GMG Recommended Practices for Battery Electric Vehicles in Underground Mining

- Caterpillar Inc. (2018). Caterpillar Performance Handbook Edition 48

- Epiroc. (2017). Minetruck MT42 Battery

- Epiroc. (2017). Scooptram ST14 Battery

- Hamel J. (2011). Celdas, Pilas y Baterías de Ion-Litio una Alternativa para....???

- Hamrin H. (2001). Underground Mining Methods and Applications.

- Hoque A., & Rennie R., & Larsen J., & Bauman J. (2020). Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines.

- Jäderblom N. (2017). From Diesel to Battery Power ind Underground Mines, A Pilot Study of Diesel Free LHDs

- Nieto A., & Schatz R., & Dogruoz C. (2020). Performance Analysis of Electric and Diesel Equipment for Battery Replacement of Tethered LHDs Vehicles in Underground Mining.

- Núñez C. (2021). Diseño de Niveles de Explotación por Hundimiento para Construcción Mecanizada y Mínima Utilización de Hormigón.

- Paraszczak J., & Svedlund E., & Fytas K., & Laflamme M. (2014). Electrification of Loaders and Trucks - A Step Towards More Sustainable Underground Mining.

- Reyes F. (2022). Diseño para Operación con Equipos Autónomos en Explotaciones Mineras por Hundimiento de Bloques o Paneles

- Ríos P., & Roy G., & Carhuancho P., & Jesus D. (2021). Propuesta de Uso de Equipo LHD a Batería como Alternativa Competitiva Frente al Equipo Diésel en el Proceso de Limpieza de Labores Subterráneas Horizontales en una Operación Minera Mecanizada

- Sandvik. (2021). Sandvik LH518B Battery Electric Loader

- Sandvik. (2021). Sandvik TH550B Battery Electric Truck

- Sandvik. (2022). Load and Haul Mobile Charging Station

- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2004). Decreto Supremo N°72, Reglamento de Seguridad Minera

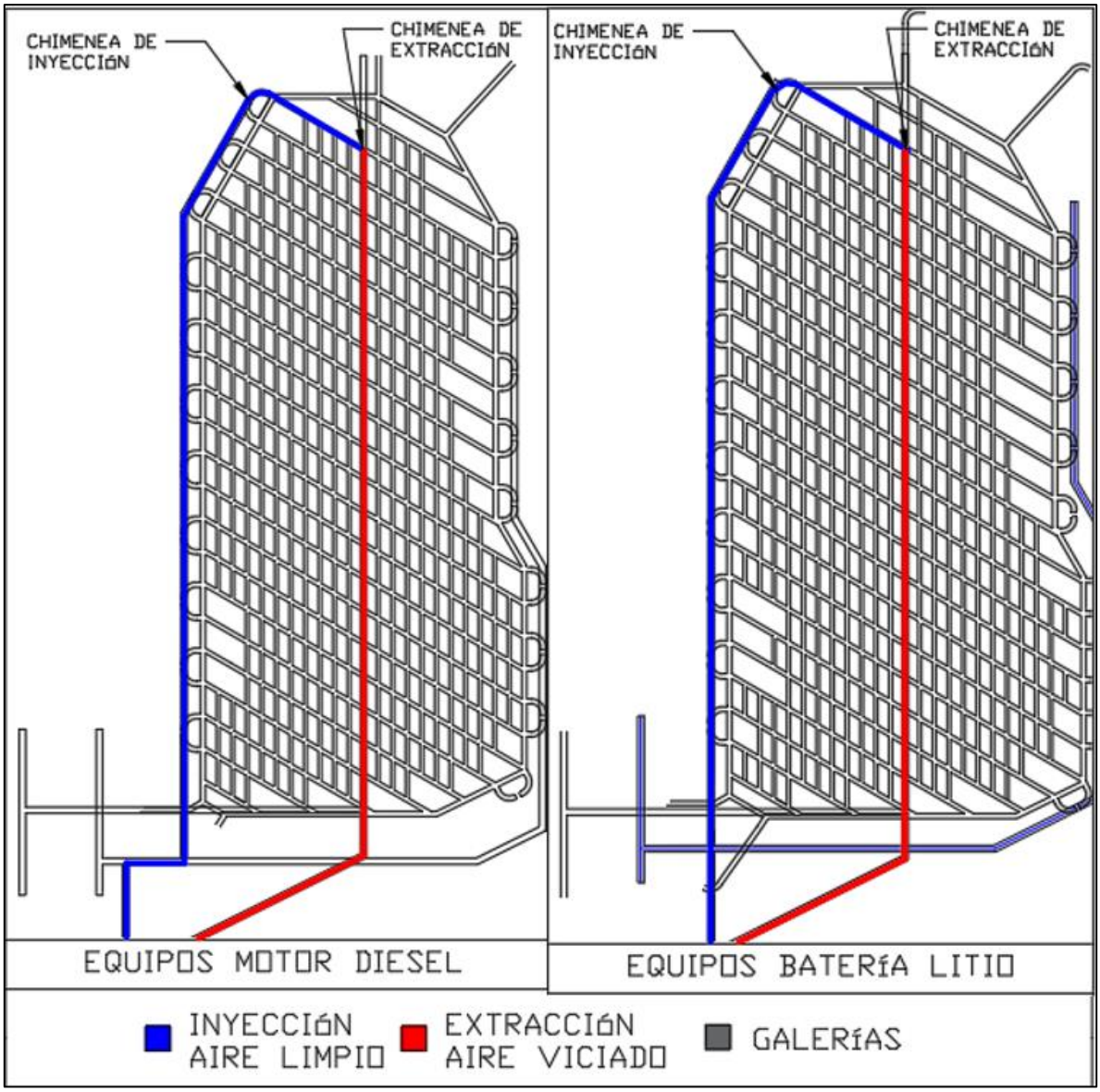
- Sociedad contractual minera el Abra. (2020). Reporte Avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero

- Tobie R., & Julin D. (1998) Block Caving: General Description. in Techniques in Underground Mining

- Zablocki A. (2020). Electromobility in Underground Mining: Towards Zero Emissions. Past, Present and Future.

Anexos

1. Circuito de ventilación considerado para el cálculo de pérdida de presión



2. Perdida de Presión caso EMD

	Unidades	Inyección 1	Inyección 2	Chimenea	Producción	Chimenea	Extracción
Perdida de presión	Pa	248	124	0,05	0,49	0,03	695
Factor de fricción	kg/m^3	0,0093	0,0093	0,0056	0,0093	0,0056	0,0093
Área	$[m^2]$	46	46	20	19	20	46
Perímetro	m	26	26	16	17	16	26
Longitud	m	499	998	32	154	20	1401
Caudal	m^3/min	27.083	13.542	711	711	711	27.083
Velocidad	m/min	589	294	36	37	36	589
Perdida de presión total	Pa	1.067					

3. Perdida de Presión caso EBL

	Unidades	Inyección 1	Inyección 2	Chimenea	Producción	Chimenea	Extracción
Perdida de presión	Pa	124	62	0,03	0,31	0,02	349
Factor de fricción	kg/m^3	0,0093	0,0093	0,0056	0,0093	0,0056	0,0093
Área	$[m^2]$	46	46	20	19	20	46
Perímetro	m	26	26	16	17	16	26
Longitud	m	499	998	32	154	20	1.401
Caudal	m^3/min	19.179	9.590	570	570	570	19.179
Velocidad	m/min	417	208	29	30	29	417
Perdida de presión total	Pa	535					