



# Reporte Energía en Minería Procesos de Extracción

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Marzo 2021



Por encargo de:



Ministerio Federal  
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza  
y Seguridad Nuclear



de la República Federal de Alemania

**Edición:**

Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40  
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn • Alemania

**Nombre del proyecto:**

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150  
7500654 Providencia  
Santiago • Chile  
T +56 22 30 68 600  
I www.giz.de

**Responsable:**

Rainer Schröer/ Rodrigo Vásquez / Javier Hueichapán

**En coordinación:**

Ministerio de Energía de Chile  
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II  
Santiago de Chile  
T +56 22 367 3000  
I www.minenergia.cl

**Título:****Reporte Energía en Minería****Autor:**

AIGUASOL

Alfredo González  
Daniel González  
Yanara Tranamil  
Catalina Bravo  
Camilo Acuña  
Javier Cabezas

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Eficiencia Energética en Minería en Chile" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

**Santiago de Chile, 2021**



## Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
1.1	PROYECTO EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA .....	5
<b>2</b>	<b>CONTEXTO Y ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
2.1	ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	6
<b>3</b>	<b>ENERGÍA EN MINERÍA</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>ESTADÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN MINERÍA</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>PROCESOS MINEROS</b> .....	<b>10</b>
5.1	PERFORACIÓN. <i>TRANSVERSAL – EXTRACCIÓN EN SECO</i> .....	10
5.1.1	<i>Descripción</i> .....	10
5.1.2	<i>Caracterización Energética</i> .....	12
5.1.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i> .....	13
5.1.4	<i>Proyectos Implementados</i> .....	18
5.2	TRONADURA. <i>TRANSVERSAL – EXTRACCIÓN EN SECO</i> .....	19
5.2.1	<i>Descripción</i> .....	19
5.2.2	<i>Caracterización Energética</i> .....	20
5.2.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i> .....	21
5.2.4	<i>Proyectos Implementados</i> .....	26
5.3	CARGUÍO. <i>TRANSVERSAL – EXTRACCIÓN EN SECO</i> .....	27
5.3.1	<i>Caracterización Energética</i> .....	27
5.3.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i> .....	30
5.3.3	<i>Proyectos Implementados</i> .....	36
5.4	TRANSPORTE. <i>TRANSVERSAL – EXTRACCIÓN EN SECO</i> .....	37
5.4.1	<i>Descripción</i> .....	37
5.4.2	<i>Caracterización Energética</i> .....	37
5.4.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i> .....	38
5.4.4	<i>Proyectos Implementados</i> .....	45
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>48</b>

## 1 Introducción

En este documento se encuentra el contenido técnico de la plataforma Web “Energía en Minería”. Esta plataforma de la Agencia de Sostenibilidad Energética el cual ha sido generado e implementado por GIZ con el apoyo del Ministerio de Energía, en el marco del proyecto “Eficiencia Energética en Minería, materias primas y clima”.

Incluye la explicación de los distintos Procesos Mineros, Medidas de Eficiencia Energética que se pueden implementar en cada uno de ellos y Proyectos Implementados, todo en el ámbito de la eficiencia energética y eficiencia operacional en minería.

El sitio web interactivo se encuentra en el siguiente enlace: [www.energiaenmineria.cl](http://www.energiaenmineria.cl).

En el sitio se encuentra el siguiente mapa interactivo de proceso mineros, que incluye información específica de cada uno de ellos, de sus medidas de eficiencia energética asociadas y ejemplo de proyectos implementados.

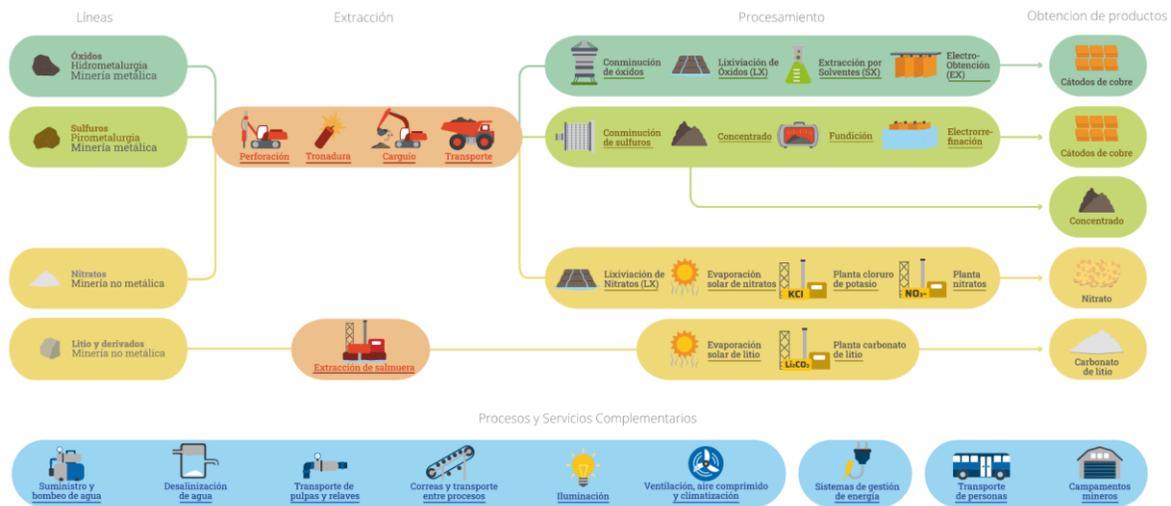


Ilustración 1. Mapa de procesos mineros. Fuente: GIZ.

El contenido técnico abarca los principales procesos consumidores de energía dentro de la Minería Metálica (Óxidos y Sulfuros) y No Metálica (Nitratos, Lito y derivados), pasando además por Procesos y Servicios Complementarios de la Minería. Estos últimos son transversales a distintos procesos, tales como: suministro de agua, desalinización, iluminación, transporte entre procesos, ventilación, etc. Se abarca además el ámbito de los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE) y los servicios específicos a los trabajadores de la minería, tales como transporte de personas y campamentos mineros.

Por cada línea de tipo de mineral (Minería Metálica y Minería No Metálica) se explican los distintos **Procesos Mineros** y sus equipos principales que se encuentran dentro de cada uno de ellos. Todo esto desde el punto de vista del consumo de energía (eléctrica o térmica). Cada Proceso además de su descripción, incluye **Medidas de Eficiencia Energética** asociadas que es posible de implementar en cada uno de ellos. Finalmente, se presentan **Proyectos Implementados** que se han ejecutado con el fin de reducir consumos de energía o hacer más eficiente su uso, dentro en cada proceso.

El contenido técnico que aparece en este documento puede ser seleccionado por el usuario de la plataforma web, debido a que el sitio cuenta con la funcionalidad de elegir lo que se desea imprimir. Adicionalmente, se tiene la opción de imprimir el contenido completo del sitio web.

El contenido del sitio web podrá ser actualizado con nuevas Medidas de Eficiencia Energética y Proyectos Implementados, por lo cual se invita a visitarlo periódicamente. Asimismo, se invita a las empresas mineras a enviarnos sus proyectos implementados en este enlace: <https://www.ener-giaenmineria.cl/contacto/>

## 1.1 Proyecto Eficiencia Energética en la Minería

La GIZ, en conjunto con la Agencia de Sostenibilidad Energética (Agencia SE) y el Ministerio de Energía, buscan motivar a las empresas mineras en el país para la implementación de proyectos y medidas de eficiencia energética. En el curso del proyecto, se busca que las empresas mejoren su balance energético y climático.

Este proyecto tiene como objetivo la implementación de medidas para el aumento de la eficiencia en el uso de recursos y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector minero. Se incluye la asesoría técnica a empresas, el desarrollo de eventos y capacitaciones, la generación de material de difusión (como el presente sitio web y guía impresa) y la implementación de una Red de Eficiencia Energética y Emisiones, basada en la metodología y conceptos de las Redes de Aprendizaje.

## 2 Contexto y antecedentes

En Chile, el sector minero es uno de los mayores responsables de la emisión de CO<sub>2</sub>. Alrededor del 30% de la electricidad chilena se usa para la extraer y procesar materias primas, principalmente el cobre. Para la generación de la electricidad necesaria para este propósito, se recurre mayoritariamente a combustibles fósiles: en Chile el 40% de la energía eléctrica se genera solo a partir del carbón. A esto se suma que además de la energía eléctrica, se requieren grandes cantidades de energía térmica para el tratamiento de los metales subsidiados (cobre, molibdeno, plata, oro, litio, etc.). Por consiguiente, se calcula que en Chile el sector minero, es responsable de más de 14 millones de tCO<sub>2</sub> anuales. En los últimos años, la demanda energética del sector minero ha aumentado anualmente un promedio de 4%. A pesar de que los procesos de producción tienen un notable potencial de ahorro y de que Chile depende casi completamente de las importaciones de petróleo, gas natural y carbón, los planes concretos para la implementación de medidas de eficiencia energética han jugado un rol minoritario.

En la actual agenda de energía (2018- 2022) se encontraba prevista la adopción de una nueva Ley de Eficiencia Energética, promulgada en febrero de 2021. Esta ley pretende aplicar medidas de ahorro energético a los mayores consumidores de energía del país, incluyendo al sector minero. Este desarrollo adquiere un empuje adicional a través de Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC 2017-22), la discusión sobre las metas ambiciosas metas nacionales en materia de protección climática (NDC) y la Conferencia Mundial del Clima COP25 ejecutada en 2019 en España siendo Chile el país anfitrión.

Para la economía chilena, la industria del cobre es el mayor motor de crecimiento. El posicionamiento de la minería en la economía política puede demostrarse en los siguientes datos: más del 9% del total de empleos, aprox. el 13% del PIB total y más del 50% de las exportaciones dependen de este sector.

**Proyecto financiado por:** Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU).

**Gestionado por:** GIZ Chile

**Contrapartes:** Ministerio de Energía de Chile, Agencia de Sostenibilidad Energética.

**Duración:** Abril 2019 – Marzo 2022

## 2.1 Estructura del proyecto

Por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU), la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) apoya al Gobierno de Chile en el marco de la Iniciativa Climática Internacional (IKI), en la integración activa del sector de materias primas a la estrategia nacional de protección del clima y en la restricción de los daños y la contaminación ambiental asociada a la extracción de estas materias. Se trata de un proyecto transnacional que, además, de las medidas en Chile, incluye actividades en el sector minero de Colombia. En Chile, el aspecto de la eficiencia energética está en primer plano. Los principales hallazgos buscan aportar al debate regional y global sobre medidas de eficiencia energética en la minería.

### 3 Energía en Minería

El sector Minero consume energía en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. Este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

El consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo (sobre 65.000 TJ al año) y el principal consumo de electricidad se observa es el área de Concentrado (sobre 50.000 TJ anuales), seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

### 4 Estadísticas de Consumo de Energía en Minería

De acuerdo con el Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019 elaborado en 2020 por Cochilco es posible comprender como se distribuye y cómo ha evolucionado el consumo de energía en el sector de la minería.

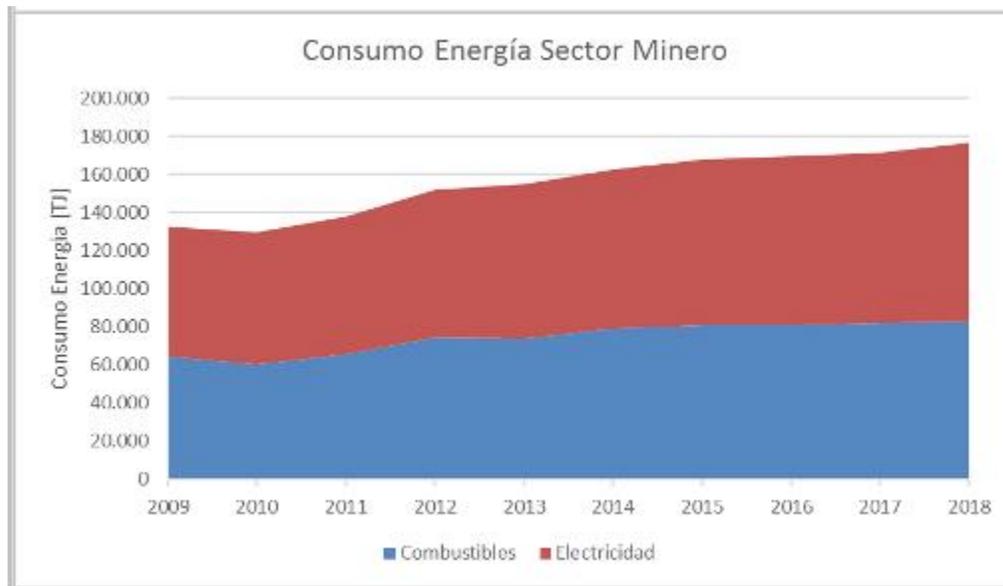


Ilustración 2. Consumo de energía en sector minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

El sector Minero consume energía tanto en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. La evolución de este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

Este consumo se observa desagregado por área de proceso en la siguiente gráfica en donde se aprecia que el consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo y se explica por el combustible utilizado por los camiones para el transporte principalmente del mineral. Los restantes consumos de combustibles en otras áreas de proceso son considerablemente menores llegando a una décima parte en la fundición que corresponde a la segunda área con mayor consumo energético en forma de combustibles. Al observar los consumos de electricidad, por otra parte, se observa que

el principal consumidor de este tipo de energético en el país es el área de concentrado que alcanza un valor sobre los 50.000 TJ anuales, seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

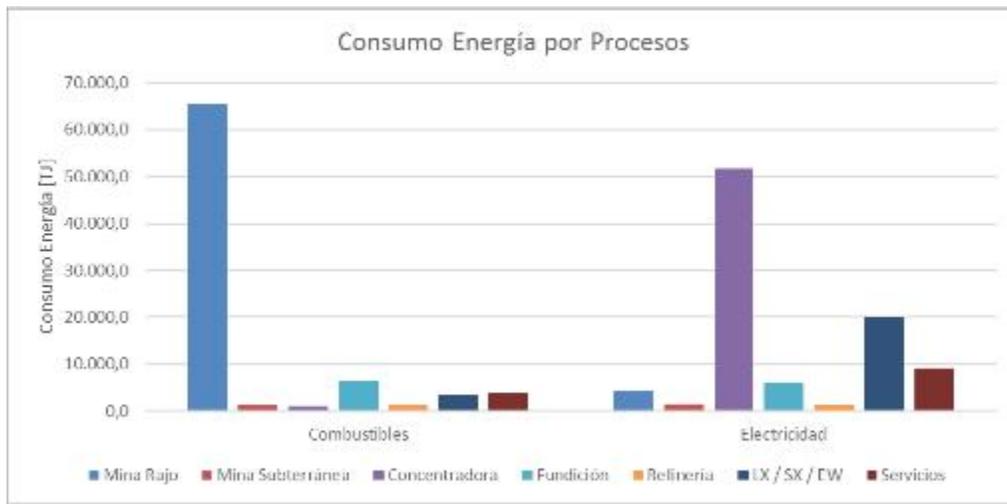


Ilustración 3. Consumo de energía por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Finalmente, podemos observar la intensidad energética, es decir el consumo de energía por tonelada de mineral fino contenido en cada área de proceso.

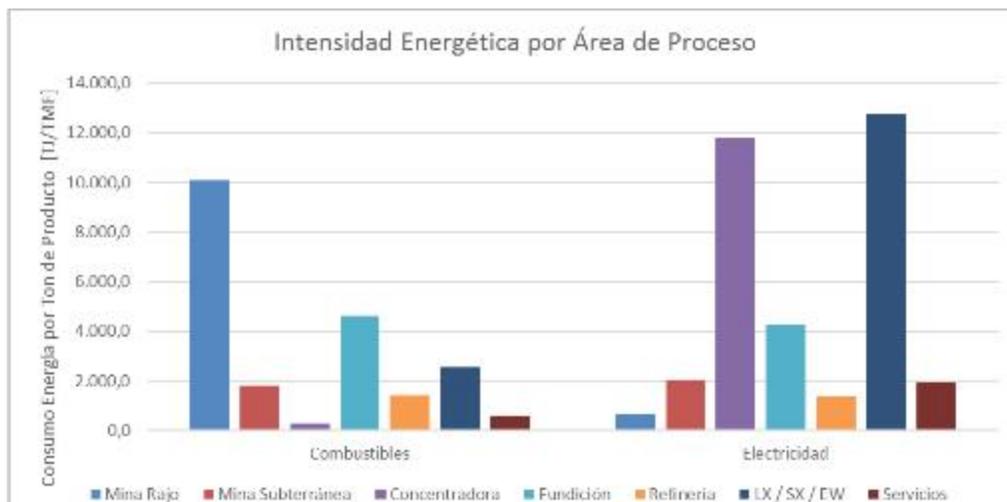


Ilustración 4. Consumo de energía en por tipo de combustibles y procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Este gráfico permite observar la relevancia del consumo de energía de otros procesos que no se observaban en el gráfico anterior, ya que esta vez el consumo se referencia a una tonelada de mineral fino procesado por cada área y no al total de consumo del país que puede verse influenciado por una mayor concentración de plantas de un tipo frente a otras. En este sentido, en términos de consumo de combustibles el área principal de consumo sigue siendo la Mina Rajo, pero le sigue en importancia el área de fundición y los procesos de hidrometalurgia. Por otra parte, en relación con el consumo de electricidad, se aprecia que los procesos ligados a la hidrometalurgia poseen la mayor intensidad de consumo eléctrico, incluso por sobre el área de concentrados que poseía los consumos eléctricos más relevantes a nivel nacional.

Finalmente, se presenta este mismo gráfico, pero sumando los componentes de combustibles y electricidad. De este modo, se puede observar la intensidad total de energía por área de proceso. Los procesos de hidrometalurgia pasan a ser el área de proceso de mayor consumo de energía por tonelada de mineral fino producido, seguido por la concentradora, mina rajo, fundición y más abajo mina subterránea, refinera y servicios.

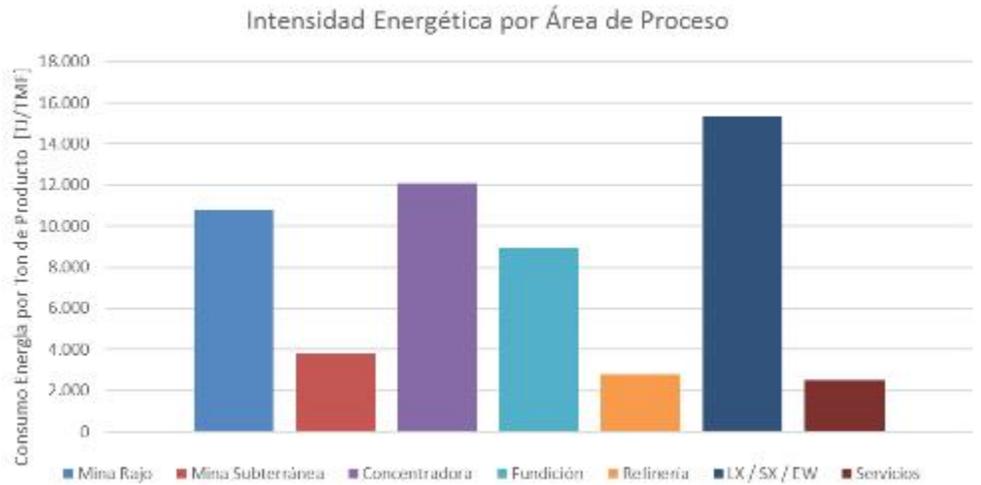


Ilustración 5. Intensidad energética por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

## 5 Procesos mineros

### 5.1 Perforación. *Transversal – Extracción en Seco*

#### 5.1.1 Descripción

La perforación es el proceso inicial que forma parte de la etapa de extracción en minería subterránea y en minería a rajo abierto, y cuyo fin es formar una cavidad cilíndrica al interior del macizo rocoso con el objeto de explorar, preparar explosiones o hacer túneles. Dicho proceso, se realiza mediante métodos fundamentalmente mecánicos, los que se pueden subdividir en dos principales categorías, la perforación rotativa y perforación de percusión. En la primera, la herramienta barrena la roca por la acción conjunta de un torque de rotación y de una importante fuerza de empuje; en cuanto a la perforación de percusión, en ésta la herramienta penetra la roca a causa de impactos sucesivos de alta frecuencia y energía [1]. Por otra parte, los métodos rotativos se subdividen en dos grupos dependiendo del tipo de broca a emplear, reconociéndose el sistema de corte y de trituración rotativa; en tanto los métodos basados en percusión se subdividen en percusión en cabeza y percusión en fondo [2]. En cuanto a la selección del método de perforación a emplear, esta debe basarse en las características físicas, geométricas y operacionales de la mina, tales como rendimientos exigidos, envergadura de las tronaduras, entre otros [3].

La construcción de los pozos o tiros de perforación considera la ejecución de las siguientes actividades [1]:

1. Programación de la ubicación y características de los pozos a perforar,
2. Selección de las herramientas a emplear,
3. Acondicionamiento de la zona de trabajo,
4. Posicionamiento de equipos,
5. Perforación,
6. Retiro y muestreo de detritus<sup>1</sup>,
7. Verificación de calidad y cantidad de tiros perforados,
8. Retiro de equipos.

El número de pozos a perforar, su ubicación y características propias respecto a otros pozos definen una malla o diagrama de perforación, la que guardará relación con las características de la roca, infraestructura de la mina y equipos disponibles.

#### ***Perforación en mina subterránea***

Cuando los minerales de interés se encuentran cubiertos por importantes cantidades de material estéril, se hace inviable económicamente su extracción a rajo abierto, requiriendo la explotación a nivel subterráneo. Para ello, se realizan labores en rocas para acceder a las zonas mineralizadas, esto mediante trabajos de tronadura y perforaciones en dirección horizontal, vertical o inclinada, conformando de esta forma túneles, galerías, rampas, piques o chimeneas. El conjunto de estas estructuras permite en efecto fragmentar, cargar y transportar el mineral desde el interior de la mina hasta la planta.

---

<sup>1</sup> El detritus corresponde al material evacuado desde los pozos de perforación producto de la penetración de la roca.



Ilustración 6. Perforadora electrohidráulica empleada en minería subterránea [4].

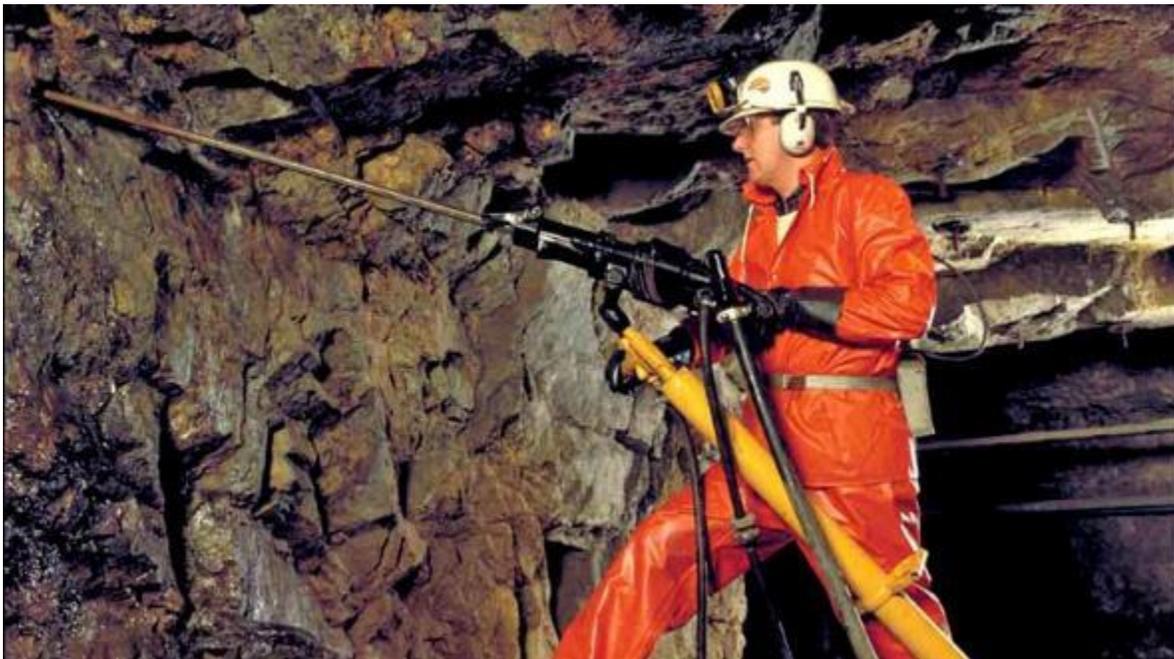


Ilustración 7. Perforación manual en minería subterránea [5].

### Perforación en mina a rajo abierto

Cuando los yacimientos se caracterizan por tener una forma regular y estar próximos a la superficie, se lleva a cabo la explotación de los minerales a rajo abierto, la cual se realiza mediante avances sucesivos laterales y en profundidad, y que inicia a través de la etapa de perforación y posterior tronadura. Este método minero se caracteriza por generar un área de trabajo de grandes dimensiones, así como de requerir maquinarias de capacidades sobresalientes.



Ilustración 8. Perforación en mina a rajo abierto [6].

#### 5.1.2 Caracterización Energética

El consumo de energía en el proceso de perforación viene dado por el uso de perforadoras, compactadores de perforación, motoniveladoras, compresores, entre otros, los cuales consumen principalmente petróleo diésel y electricidad.

Para caracterizar el nivel de consumo energético asociado al proceso de perforación en minería subterránea y a rajo abierto, se muestra la siguiente gráfica, la cual muestra la distribución porcentual del consumo energético asociado a la etapa de extracción de cobre. En esta imagen, es posible apreciar que el porcentaje de consumo energético asociado al proceso de perforación es inferior al 5% en minas a rajo abierto, aproximándose por otro lado a un 15% para minas subterráneas.

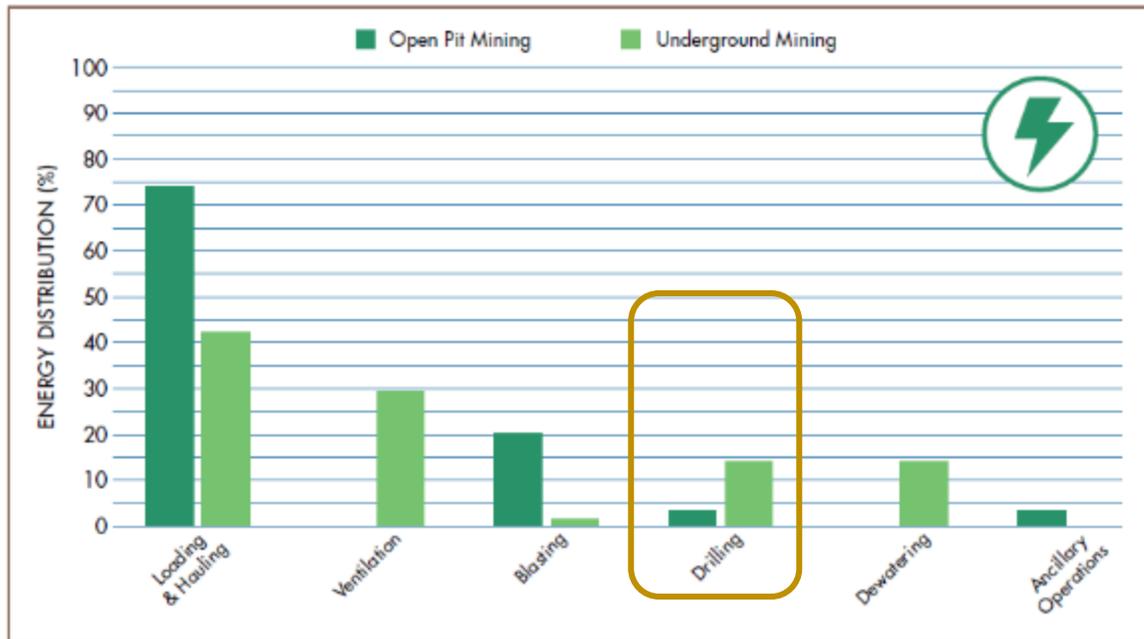


Ilustración 9. Distribución porcentual del consumo energético asociado a la extracción de cobre [7].

### 5.1.3 Medidas de Eficiencia Energética

#### 5.1.3.1 Selección adecuada de equipo de perforación de percusión. M1.1

##### Medida de diseño

##### Medida de extracción

La elección entre un equipo de percusión de martillo en cabeza o en fondo debe basarse en el tipo de roca a perforar y de las características de la perforación a realizar.

El **martillo en cabeza** puede ser neumático o hidráulico, dependiendo del fluido de trabajo que se utilice (aire o aceite, respectivamente).

- Las **perforadoras con martillo en cabeza neumático** corresponden a equipos sencillos y de bajo costo de adquisición y mantención, los cuales suelen emplearse para perforaciones de diámetros que no superan los 90 mm y para profundidades de barreno inferiores a 20 m. Estas limitaciones se explican fundamentalmente por las pérdidas energéticas que se generan en la transmisión de la onda de choque a través del varillaje y por la desviación de los barrenos cuando se superan los valores mencionados.
- Los **equipos de martillo en cabeza hidráulicos** se caracterizan por poseer un menor consumo energético, poseer mayor capacidad de perforación y ser más automatizables. Por el contrario, su costo suele ser mayor y su mantenimiento más complejo, requiriendo una mayor formación del equipo mecánico.



Perforadora con martillo en cabeza (Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/martillo-en-cabeza/>)

Con los **equipos de martillo en fondo** se pueden realizar perforaciones cuyos diámetros se encuentran dentro del rango de los 89 y 250 mm, a mayor profundidad que los equipos de martillo en cabeza y con una desviación mucho menor.

Ventajas del uso de equipos de perforación en fondo:

- Velocidad de penetración constante, no disminuyendo con la profundidad como ocurre con la perforación de martillo en cabeza;
- Generación de un menor desgaste de boca debido a una limpieza del fondo del barreno más efectiva;
- Facilita la carga del explosivo al no generar suciedad excesiva en las paredes del barreno;
- Genera desviaciones muy inferiores a las que ocurren en los equipos con martillo en cabeza

Desventajas del uso de equipos de perforación en fondo:

- Se caracterizan por poseer una productividad menor a los de martillo en cabeza;
- No suelen emplearse para diámetros pequeños;
- Se les asocia el riesgo de pérdida del martillo por un posible atasco o colapso de las paredes del barreno, siendo el martillo un elemento de considerable costo económico;
- Requieren de emplear compresores de alto rendimiento para su operación.



Perforadora con martillo en fondo. Fuente: <https://es.rotarypercussivedrill.com/Products/Perforadoras-DTH.html>

Una alternativa a emplear en reemplazo a la perforación de martillo en fondo o perforación de martillo en cabeza es la opción asociada a un **diseño híbrido** que combina estos dos tipos de mecanismos. Su nombre comercial es Coprod y combina las características de los dos tipos de martillo. Las perforadoras que incorporan este sistema se asemejan a las perforadoras tradicionales de martillo en cabeza, pero la percusión y rotación se realizan por separado.

Ventajas de un sistema híbrido respecto a equipos de martillo en cabeza:

- Ofrecen la posibilidad de perforar a mayor diámetro con menor desviación,
- Reducen el desgaste en juntas y manguitos
- Permiten mayor productividad y menos riesgo de atascos.

Ventajas de un sistema híbrido respecto a equipos de martillo en fondo:

- Mayor productividad
- No se requiere de un compresor de alto rendimiento
- Menor consumo de combustible

Como resumen, la adecuada elección de un equipo de perforación con el fin de incrementar la eficiencia energética deberá considerar:

- a) Diámetro de perforación
- b) Altura de banco
- c) Ritmo de perforación
- d) Tolerancia de desviaciones
- e) Resistencia a la compresión simple de la roca, junto con otras propiedades físicas de la roca como dureza, abrasividad, plasticidad, elasticidad, textura, estructura, entre otras.

Fuente: [8].

Más información: [http://oa.upm.es/40237/1/PFG\\_DIEGO\\_GONZALEZ\\_CABRERO.pdf](http://oa.upm.es/40237/1/PFG_DIEGO_GONZALEZ_CABRERO.pdf)

### 5.1.3.2 Posicionamiento y alineación adecuada de barrenos. M1.2

#### Medida operacional

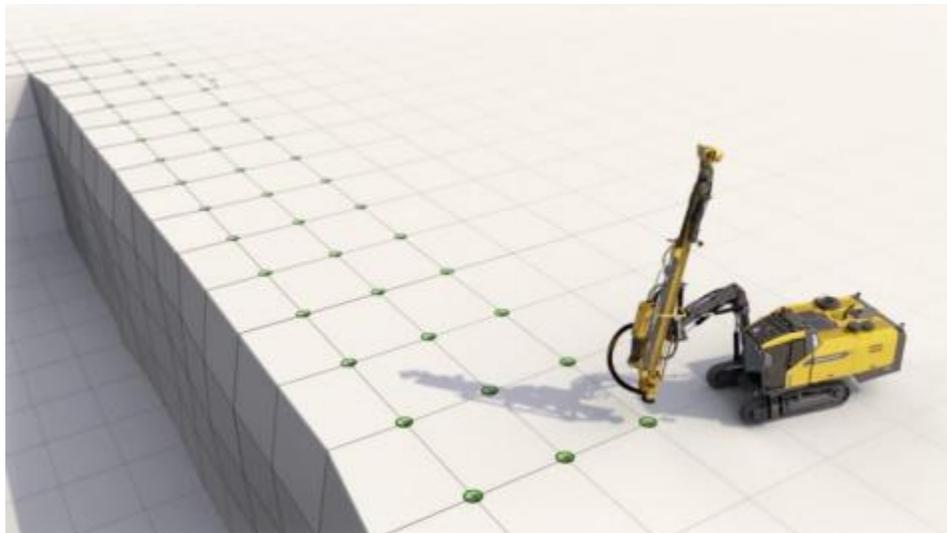
#### Medida de extracción

Un correcto posicionamiento y alineación adecuada del barreno es primordial para incrementar la eficiencia del proceso de perforación.

Previo a iniciar el proceso de perforación, se debe conocer detalladamente la orientación e inclinación de cada barreno, ya que en base a esta información se podrá asegurar un correcto diseño de la malla de perforación y en consecuencia se podrán optimizar los resultados de la tronadura. Teniendo esto en consideración, el proceso de perforación se debe iniciar situando la máquina en un terreno libre de baches o piedras sueltas para así evitar inestabilidades en la operación. Algunas perforadoras consideran un apoyo hidráulico trasero, cuyo fin es brindar estabilidad a la máquina y así evitar la existencia de pequeños desplazamientos durante la perforación del macizo rocoso.

Iniciado el proceso de perforación, es de relevancia asegurar que no ocurran errores de operación tales como errores de emboquille, de inclinación o desviación a lo largo del barreno. De estos errores, el más difícil de determinar corresponde a este último, el que puede provocarse por una incorrecta selección de los parámetros de los equipos de perforación (una excesiva fuerza de empuje, por ejemplo) o bien por la geología del macizo rocoso (las fracturas de este último son zonas de debilidad que pueden provocar que la barrena de perforación se alinee en esa dirección) [8].

Para determinar la dirección real de los barrenos se emplean generalmente sistemas que se basan en sondas que se introducen al interior del barreno, y las cuales están dotadas de inclinómetros que indican la desviación en función de la profundidad. Esta sonda puede introducirse en el barreno por medio de barras rígidas articuladas o bien por medio de elementos flexibles. Cabe señalar que al implementar este tipo de tecnología es posible reducir el tiempo de posicionamiento de la perforadora a la hora de realizar los distintos barrenos, aumentando la productividad de la ejecución de la perforación [9].



Perforadora con martillo en fondo. Fuente: web Atlas-Copco

Más información: [http://oa.upm.es/40237/1/PFG\\_DIEGO\\_GONZALEZ\\_CABRERO.pdf](http://oa.upm.es/40237/1/PFG_DIEGO_GONZALEZ_CABRERO.pdf)

### 5.1.3.3 Implementación de técnicas de medición durante el proceso de perforación. M1.3

#### Medida operacional

#### Medida de extracción

Las técnicas de medición durante la perforación (Measurement while drilling - MWD) corresponde a una metodología de medición de datos en tiempo real que permiten reducir el tiempo de trabajo así como mejorar la fiabilidad del diseño de las explosiones. Si bien la mayoría de las operaciones mineras utilizan un patrón de voladura estándar para cada barreno el cual se basa en un único factor de roca para todo el banco o la región de tronadura, la información que se obtienen de los datos de MWD puede mejorar el diseño del proceso al proporcionar datos más precisos de las propiedades del macizo rocoso para cada barreno. A partir de este proceso, en efecto, se pueden tomar decisiones sobre el tipo y cantidad de carga explosiva para colocarlos en un pozo de tronadura en particular o para optimizar el tiempo de detonación entre pozos. Asimismo, esto podría ayudar a reestructurar el diseño de la malla de perforación que pueda maximizar el rendimiento de la tronadura.

Las técnicas de medición en tiempo real entregan un conjunto de parámetros que no sólo reflejan las propiedades de la roca sino también los ajustes de la perforación. Como ambos varían a lo largo del barreno, el enfoque consiste en considerarlos como un conjunto de datos entrelazados que luego deben ser filtrados a través de un algoritmo apropiado. Los parámetros en cuestión pueden dividirse en tres categorías: 1) medidos, 2) calculados y 3) deducidos. Los parámetros medidos son, por ejemplo, las RPM o revoluciones por minuto, el volumen de aire de arrastre, la vibración, la fuerza de arrastre, la profundidad de la broca y la presión de rotación. Los parámetros calculados, por otra parte, incluyen valores directos como la tasa de penetración y el torque, y valores indirectos como la energía específica. Por último, los parámetros inferidos son los que dependen de las condiciones de funcionamiento y cuyo cálculo debe calibrarse en función del equipo de perforación, las propiedades locales de la roca y estructura y el rendimiento de la perforación. Ejemplos de estos parámetros son el índice de blastabilidad y el índice de conminución [10].



MWD. Fuente: <https://tbrinfo.wordpress.com/2017/08/02/geosteering-and-measurement-while-drilling-technologies-to-provide-real-time-data/>

### 5.1.4 Proyectos Implementados

<p><b>Mejora en gestión de proceso de perforación</b></p> <p>Caso: Ampliación Mallas Tronadura Lastre LOS PELAMBRES ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Disminución de los metros de perforación mediante la modificación de la malla de tronadura. Se considera estandarizar los diámetros de perforación y realizar pruebas para encontrar el match óptimo entre el tipo de material, tipo de explosivo y tiempo de iniciación electrónica de detonación</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>2.614 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 3.073 tCO<sub>2</sub>e/año</p> <p>Ahorro Diésel: 673.409 l/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/Reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/Reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Mejora en gestión de proceso de perforación</b></p> <p>Caso: Gasto y Producción en Perforación. MINERA ANTUCOYA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Capacitar a operadores con mejores prácticas operacionales que permitan realizar gestión en materia de reperfusión y sobreperfusión; habilitar sistemas de control con nuevos parámetros de operación e identificar oportunidades de mejora en velocidad de perforación.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>476.441 l/año (diésel)</p> <p>Reducción emisiones: 1.425 tCO<sub>2</sub>e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/Reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/Reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Perforación remota</b></p> <p><b>Mina Los Bronces Angloamerican</b></p>	<p>En 2019, Angloamerican lanza una nueva tecnología de perforación electro-hidráulica de rocas a través de operaciones subterráneas seleccionadas de PGM. Desarrollados en colaboración con los proveedores, los nuevos taladros mejoran significativamente la eficiencia energética y la productividad en comparación con los anteriores taladros neumáticos para roca. En 2016 se instalaron dos consolas de operación remota en un vehículo, y se instaló un sistema de comunicación punto a punto en un par de taladros. Estas unidades pudieron comunicarse a través de una "línea de visión" y a una distancia de hasta 1.000 metros. Poco después, se implementaron sistemas de comunicación wifi y redes de fibra óptica para operar seis unidades de perforación desde la Sala de Administración Operacional.</p>	<p><a href="https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/PLC/investors/annual-reporting/2020/aa-sustainability-report-2019-v1.pdf">https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/PLC/investors/annual-reporting/2020/aa-sustainability-report-2019-v1.pdf</a></p> <p><a href="https://www.worldenergytrade.com/metales/mineria/el-nuevo-proyecto-de-perforacion-teleremota-en-la-mina-de-cobre-mas-grande-y-prominente-de-chile">https://www.worldenergytrade.com/metales/mineria/el-nuevo-proyecto-de-perforacion-teleremota-en-la-mina-de-cobre-mas-grande-y-prominente-de-chile</a></p>
<p><b>Incorporación de Perforadoras autónomas</b></p>	<p>Minera Los Pelambres inició la puesta en marcha de un nuevo sistema de perforación de pozos para</p>	<p>Fuente: Reporte Minero</p> <p><a href="https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2020/07/minera-los-">https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2020/07/minera-los-</a></p>

<p><b>Minera</b></p> <p><b>Los Pelambres AN-TOFAGASTA MINERALS</b></p>	<p>las tronaduras en su yacimiento en base a la incorporación de perforadoras autónomas.</p> <p>Las ventajas de esta nueva forma de perforar pozos -etapa previa a la carga de explosivos para la tronadura- son varias. La más importante de ellas es el aumento en la seguridad de las personas, además de mejoras en términos de producción.</p> <p>Desde una sala de control ubicada a dos kilómetros de distancia del rajo, dos perforadoras Pit Viper 351 son operadas de manera remota por trabajadores que fueron cuidadosamente capacitados para ello, en tiempo real, cómodamente sentados frente a mandos y pantallas que les brindan total control sobre la perforadora y sus movimientos.</p> <p>En términos de eficiencia energética, el rendimiento de las perforadoras autónomas ha mostrado un incremento entre un 5 y 10%, con más de 5 mil metros perforados por sobre lo estimado, principalmente debido al tiempo ahorrado -entre una y dos horas diarias- en cambios de turno, colación y evacuaciones por tronaduras.</p>	<p>pelambres-primera-operacion-minera-con-equipos-de-perforacion-autonomos</p>
--	--	--

## 5.2 Tronadura. *Transversal – Extracción en Seco*

### 5.2.1 Descripción

El proceso de tronadura es parte de la etapa de extracción de minerales, y corresponde a una operación realizada tanto en minas a rajo abierto como en minas subterráneas. Su objetivo consiste en fragmentar el macizo rocoso, logrando reducir su tamaño a un diámetro que por lo general es menor a 1 metro. El proceso en particular consiste en depositar el explosivo en los pozos de perforación construidos, para luego establecer una secuencia de detonaciones, llevando a cabo una fragmentación de la roca por etapas. Los fragmentos de roca resultantes posteriormente son cargados y transportados al chancado primario o a los botaderos [3].

La metodología de trabajo asociada a la tronadura varía en función de cada mina, pero por lo general, se pueden resumir en las siguientes actividades [3], [1]:

1. Acondicionamiento de la zona de operación (incluyendo el aislamiento del sector),
2. Llegada y posicionamiento de carguío de explosivos,
3. Colocación de explosivo y accesorios necesarios,
4. Control de calidad del explosivo (en ciertos casos),
5. Entacado del pozo,
6. Amarre según secuencia de detonación especificada,
7. Revisiones de seguridad en el sector,
8. Primer aviso de detonación,
9. Avisos posterior y último,
10. Tronadura,
11. Ventilación o limpieza del sector,
12. Revisión de seguridad,

13. Quema de tiros quedados,
14. Reducción secundaria (en caso de ser necesario).

Una vez que las perforaciones se han llevado a cabo y se han comprobado los respectivos requisitos de calidad y cantidad impuestas, se inicia la operación.

En efecto, la tronadura corresponde al primer proceso de conminución, por lo que es de relevancia que ésta se lleve a cabo con éxito para así permitir un buen manejo posterior del material resultante.



Ilustración 10. Proceso de tronadura [11].

### 5.2.2 Caracterización Energética

La fragmentación de rocas requiere de aplicación de energía, la cual se obtiene a partir de reacciones químicas resultantes de la detonación de cargas explosivas insertas en el macizo rocoso. Los explosivos químicos empleados en este proceso se clasifican en dos en función de su onda de choque: explosivos rápidos y detonantes, los que trabajan a velocidades de 2.000 y 7.000 [m/s], y explosivos lentos y deflagrantes, con velocidades inferiores a 2.000 [m/s]. En minería extractiva, se trabaja fundamentalmente con los primeros [12].

Por otro lado, en este proceso, los equipos implementados corresponden principalmente a blasters, loggers, detonadores, explosivos, camiones fábrica y polvorín.

En cuanto al consumo energético asociado a la tronadura en minería subterránea y a rajo abierto, este se puede observar en la siguiente gráfica, la cual muestra la distribución porcentual del consumo energético asociado a la etapa de extracción de cobre. En esta imagen, es posible apreciar que el porcentaje de consumo energético asociado al proceso de tronadura es aproximadamente del 20% en minas a rajo abierto, y aproximadamente del 2% para minas subterráneas.

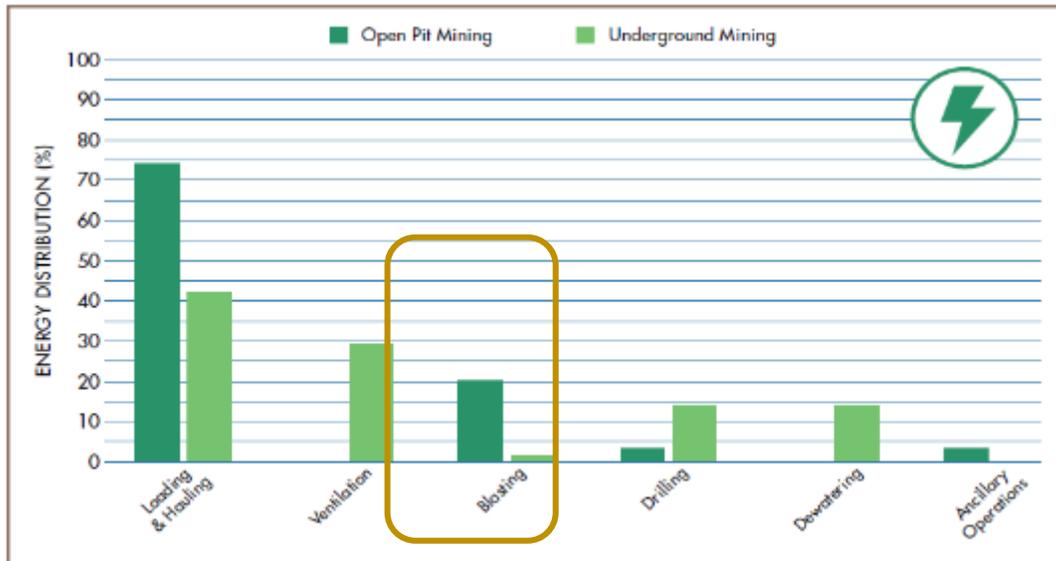


Ilustración 11. Distribución porcentual del consumo energético asociado a la extracción de cobre [7].

### 5.2.3 Medidas de Eficiencia Energética

#### 5.2.3.1 Estudio previo de características del macizo rocoso. M2.1

##### Medida operacional

##### Medida de extracción

El estudio de las características del macizo rocoso juega un papel fundamental en todos los aspectos de la tronadura. La cantidad de energía y la distribución de explosivos deben ajustarse a las características geológicas y geotécnicas de aquél para que dicho proceso se ejecute de manera efectiva. En la práctica, la voladura implica la interacción entre los productos de la detonación de un explosivo y el macizo rocoso de interés [13], por esta razón, es fundamental tener una comprensión detallada de las características in situ del banco a tronar, para así dar paso a una fragmentación óptima y una cantidad aceptable de remoción de material.

Las propiedades de los macizos rocosos tales como su litología, alteración, resistencia a la compresión, discontinuidades y presencia de agua, se pueden obtener mediante estudios geofísicos, estudios geoquímicos, mediante mediciones durante la perforación junto con el procesamiento, manipulación y la visualización de datos por computadora, entre otros [14]. A partir de estos estudios se podrá caracterizar el macizo rocoso y con ello saber las directrices que permitirán aumentar el rendimiento de la tronadura. A continuación, se presenta un resumen de los parámetros geológicos y geotécnicos que afectan en la efectividad de esta última [15].

Tabla 1. Resumen de parámetros geológicos y geotécnicos y su incidencia en el proceso de tronadura.

Fuente: [15]

Parámetro		Efecto en la tronadura
Litología	Textura	Estos parámetros inciden en la resistencia de la matriz rocosa y controlan la densidad de la roca. En términos generales,
Alteración	Composición	

Parámetro		Efecto en la tronadura
		mayor densidad implica una aplicación mayor de energía.
<b>Resistencia a la compresión simple</b>		Mayor resistencia implica mayor energía de la onda de choque para generar nuevas fracturas.
<b>Discontinuidades menores</b>	Orientación	Canaliza dirección de penetración de gases
	Espaciamiento	Fracturas más espaciadas y menos persistentes implican menos planos de debilidad preexistentes. Además, la efectividad de gases es menor
	Continuidad o persistencia	
	Abertura	Mayor abertura implica menos energía de la onda de choque para generar tracción y mayor espacio para expansión de gases
	Relleno	El tipo de relleno determina la cohesión y energía de la onda de choque para generar tracción en la estructura
	Alteración de paredes	El tipo y grado de alteración determina la energía de la onda de choque para generar tracción en la estructura
	Rugosidad	Las estructuras más rugosas necesitan más energía de la onda de choque para despegarse
<b>Discontinuidades mayores</b>	Espesor	Pueden canalizar los gases o definir otros dominios geotécnicos dependiendo del espesor
	Tipo de relleno	
<b>Condición de agua</b>		Disminuye esfuerzos efectivos del macizo rocoso y afecta al rendimiento de los explosivos

### 5.2.3.2 Implementación de estrategia de optimización Mine-to-Mill. M2.2

#### Medida operacional

#### Medida de extracción

La optimización Mine to Mill corresponde a una estrategia aplicada a los diferentes procesos de conminución que se llevan a cabo en una mina cuyo fin es reducir el consumo energético y sus respectivos costos, esto, mediante la optimización operacional de cada uno de estos procesos.

Una tradicional estrategia de optimización Mine to Mill incluye cuatro pasos fundamentales:

- 1) **Estudio de alcance:** El estudio de alcance consiste en realizar una visita al lugar de interés para revisar las prácticas actuales dentro de los distintos procesos de conminución tales como tronadura, chancado y molienda, y de esta forma descubrir posibles áreas de mejora. Se identifican los dominios de roca y se determinan las características del macizo rocoso.
- 2) **Análisis:** Se recogen muestras alrededor de todos los chancadores y molinos en diversas condiciones de funcionamiento para su análisis.
- 3) **Optimización:** Los datos recogidos en la etapa de análisis se utilizan en la etapa de optimización junto con los paquetes informáticos para optimizar las estrategias de operación de la mina y la planta.
- 4) **Implementación:** Finalmente, las estrategias que presentan ventajas superiores respecto a las demás, las cuales se identifican en la etapa de optimización, se implementan para mejorar el rendimiento total del sistema. Un análisis detallado es una parte fundamental en esta última etapa para cuantificar cualquier mejora realizada en el rendimiento global, el costo o la utilización de energía en la operación.

La implementación de la estrategia de optimización Mine to Mill ha sido aplicada con éxito en operaciones de oro, cobre, plomo/zinc, entre otros, produciendo incrementos de productividad que oscilan en un 5 a un 18%, así como reduciendo costos en torno al 10% [16].

Más información:

<http://www.encuentrometalurgia.com/mine-to-mill-2020/>

<https://www.mch.cl/2017/10/20/una-metodologia-cientifica-mas-alla-del-concepto-mine-to-mill/>



Fuente: Sormak Mining Company – Altra Industrial Motion

### 5.2.3.3 Selección adecuada de explosivos para tronadura. M2.3

Medida operacional

Medida de extracción

La elección del explosivo apropiado forma parte importante del diseño de una tronadura y, en consecuencia, de los resultados a obtener, para lo cual deben evaluarse correctamente las características básicas de un explosivo. Dichas características se pueden resumir en:

1. Potencia explosiva

2. Poder rompedor
3. Velocidad de detonación
4. Densidad de encartuchado
5. Diámetro crítico
6. Masa crítica
7. Resistencia al agua
8. Estabilidad química

Con relación a la **potencia explosiva**, esta corresponde a la capacidad que posee un explosivo para quebrantar y proyectar la roca, y la cual depende fundamentalmente de la composición del explosivo, pudiendo optimizarse con una adecuada técnica de tronadura.

El **poder rompedor**, por otra parte, corresponde a una característica del explosivo que indica la capacidad de quebrantar la roca a causa exclusiva de la onda de detonación y no al conjunto de la onda de detonación más la presión de los gases.

La **velocidad de detonación** es una característica a tener en cuenta en la elección del explosivo. En términos generales, se eligen por explosivos de detonación lenta cuando la tronadura se aplique a rocas blandas o se requiera una fragmentación gruesa, mientras que se escogerán explosivos dotados de elevada velocidad de detonación cuando se pretendan fragmentaciones más intensas en rocas duras.

La **densidad**, por otra parte, es una característica de relevancia de los explosivos. Dicho parámetro mientras mayor sea, mayor será la concentración de carga para un diámetro de barreno determinado. Normalmente la densidad relativa de los explosivos está comprendida entre 0,8 y 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

El **diámetro crítico** de una carga cilíndrica corresponde al límite inferior que por debajo de él la onda de detonación no se propaga o lo hace a una velocidad muy inferior a la nominal. En cuanto a la **masa crítica**, esta corresponde a la cantidad mínima del explosivo que necesita para que se produzca la detonación por efecto de una llama.

La **resistencia al agua**, por otra parte, corresponde a la característica del explosivo de mantener sus propiedades inalterables durante un periodo de tiempo en contacto con el agua. Las dinamitas gelatinosas, hidrogeles y emulsiones resisten perfectamente cuando son cargados en barrenos con agua y por ello que son empleados bajo estas condiciones. No obstante, los productos pulverulentos y ANFOs (Ammonium Nitrate + Fuel Oil) no resisten al agua por el carácter soluble del nitrato amónico.

Por último, la **estabilidad química** de un explosivo corresponde a la capacidad de mantenerse químicamente estable con el paso del tiempo. La estabilidad se garantiza si las condiciones de almacenamiento y el periodo de este son adecuados, permitiendo dar seguridad al usuario al momento de iniciar el trabajo de tronadura. Cabe señalar que los almacenamientos prolongados o condiciones de humedad, temperatura y/o ventilación inadecuadas, pueden originar la desestabilización del explosivo y, en consecuencia, facilitar su descomposición y respectivo rendimiento [9].



Fuente: Revisa Seguridad Minera

#### 5.2.3.4 Factores a considerar en el diseño de tronadura. M2.4

##### Medida operacional

##### Medida de extracción

El propósito de la tronadura corresponde a fragmentar el macizo rocoso de interés, sin incurrir en la afectación de elementos ajenos a este proceso. Para lograr este objetivo, y obtener un correcto rendimiento de la tronadura, se deben tener en consideración tres factores fundamentales en el diseño y control de dicho proceso, los cuales corresponden a:

1. **Una correcta cantidad de energía:** para lograr los resultados esperados se requiere de una cantidad de explosivos adecuada en función de las condiciones de borde que se presenten.
2. **Una correcta distribución de energía:** el explosivo implica la transformación de energía química en energía mecánica, de modo que una distribución de energía inadecuada puede dar lugar a una fragmentación no deseada o bien, a concentraciones de energía que pueden afectar a elementos ajenos a los elementos de interés.
3. **Un correcto confinamiento de energía:** para una correcta operación del explosivo es necesario que los gases generados se encuentren confinados en el barreno, esto con el fin minimizar las pérdidas de energía.

Por otra parte, es de relevancia considerar los factores geométricos relacionados con el método de explotación, los cuales pueden resumirse en el diámetro, longitud, inclinación, número y distribución de barrenos. Asimismo, deben considerarse los factores asociados al explosivo y a las propiedades del macizo rocoso.



Fuente: Revisa Nueva Minería & Energía

#### 5.2.4 Proyectos Implementados

<p><b>Gestión de mallas de perforación y cambio de explosivos</b></p> <p>Caso: Reducción consumo explosivos.</p> <p>MINERA ANTUCOYA/ ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Disminución en la carga de explosivos, dado por una mejor gestión de las mallas de perforación y por cambio de explosivo.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>40.861 l/año (diésel)</p> <p>Reducción emisiones: 122 tCO<sub>2</sub>e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Gestión de mallas de perforación y cambio de explosivos</b></p> <p>Caso: Triple iniciación en tronadura.</p> <p>MINERA ZALDIVAR ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Modificación de mallas de tronadura, utilizando triple iniciación y definiendo la mezcla de explosivos a utilizar dependiendo de la geología del terreno. Análisis y resultados de las pruebas incluyendo P80 y porcentaje de fino desde terciario: análisis del costo adicional por triple iniciación y el ahorro energético en chancadoras. Elaboración de modelo de línea base que caracterice el consumo energético de chancado en función del P80</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>2.286 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 908 tCO<sub>2</sub>e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>

### 5.3 Carguío. *Transversal – Extracción en Seco*

El proceso de carguío es parte de la etapa de extracción en minería subterránea y minería a rajo abierto, y su propósito consiste en retirar el material tronado de la frente y depositarlo en maquinarias de transporte. El inicio de este proceso se efectúa una vez finalizado el proceso de tronadura y luego de haber verificado que la operación es posible ejecutarla de manera segura (se identifican tiros quedados, zonas de posibles derrumbes, entre otros). Bajo esas condiciones, se recurren a las maquinarias de trabajo, las que en su conjunto se posicionan en el lugar de operación. Una vez posicionados, los equipos de carguío extraen el material tronado para depositarlo en el equipo de transporte, para lo cual se requiere de un área de trabajo en el que ambos equipos puedan operar sin inconvenientes [17].

En efecto, la metodología de trabajo asociada al carguío se puede resumir en las siguientes actividades:

1. Preparación de la zona a trabajar,
2. Posicionamiento de equipos,
3. Retiro de material tronado,
4. Traspaso de material a las maquinarias de transporte.



Ilustración 12. Proceso de carguío.

#### 5.3.1 Caracterización Energética

El proceso de carguío se lleva a cabo a través de maquinarias cuya principal fuente de energía corresponden a petróleo diésel y energía eléctrica. Estas maquinarias, se clasifican en unidades discretas de carguío, como es el caso de palas y cargadores, y en unidades de flujo continuo, como es el caso de excavadores de balde que realizan una operación continua de extracción de material. Por otra parte, éstas pueden clasificarse en equipos sin acarreo (su base no se desplaza en cada operación de carguío) y en equipos con acarreo mínimo (pueden desplazarse a cortas distancias). Los

equipos de carguío sin acarreo se resumen en los siguientes: palas eléctricas de cables, retroexcavadoras, palas hidráulicas y palas neumáticas, las que se emplean usualmente en minería a rajo abierto. En cuanto a los equipos de carguío con acarreo mínimo, estos se resumen en cargadores frontales y cargadores Load-Haul-Dump (LHD) [18], equipos que se emplean frecuentemente en minería subterránea. Cabe señalar que los LHD corresponden a palas de bajo perfil que pueden clasificarse como equipos de carguío con acarreo mínimo o como equipo combinado de carguío y transporte.

Para dimensionar las capacidades de estos equipos, a continuación, se presenta información técnica referente a algunas de estas maquinarias:

Tabla 2. Modelo de palas retroexcavadoras con sus respectivas potencias y alcances [18].

Modelo	Potencia kW/HP	Peso de Operación kg/lb
1	40/54	7.350/16.200
2	59/79	11.390/25.100
3	63/84	12.340/27.200
4	74/99	15.560/34.300
5	74/99	15.970/35.200
6	95/128	19.120/42.150
7	85/128	21.300/46.960
8	114/153	10.860/23.950
9	125/168	28.120/62.000
10	166/222	32.700/75.000
11	213/286	50.800/112.000
12	319/428	81.650/180.000
13	319/428	84.820/187.000

Tabla 3. Modelo de cargadores frontales con sus respectivas potencias y alcances [18].

Modelo	Potencia HP	Peso de Operación lb
1	80	15.452
2	105	20.081
3	120	24.574
4	105	21.336
5	140	28.731
6	170	36.521
7	200	38.936

Modelo	Potencia HP	Peso de Operación lb
8	220	46.096
9	250	51.268
10	275	61.046
11	400	97.727
12	610	161.994
13	690	196.557
14	1.250	390.300

Tabla 4. Modelo de cargadores LHD con sus respectivas potencias y alcances [19].

Modelo	Potencia kW	Peso de Operación kg
1	50	8.800
2	160	18.020
3	204	28.500
4	235	28.500
5	256	38.100
6	310	46.000
7	352	58.800

A nivel energético, el proceso de carguío en conjunto con el proceso de transporte presenta el comportamiento que se muestra en la siguiente gráfica, la cual muestra la distribución porcentual del consumo energético asociado a la etapa de extracción de cobre, diferenciando el caso de minería a rajo abierto y minería subterránea. En esta gráfica, es posible apreciar que el porcentaje de consumo energético asociado al proceso carguío y transporte en minería a rajo abierto se acerca al 75% respecto al consumo total de energía asociado al proceso de extracción; en cuanto a la minería subterránea, ésta se aproxima al 43%.

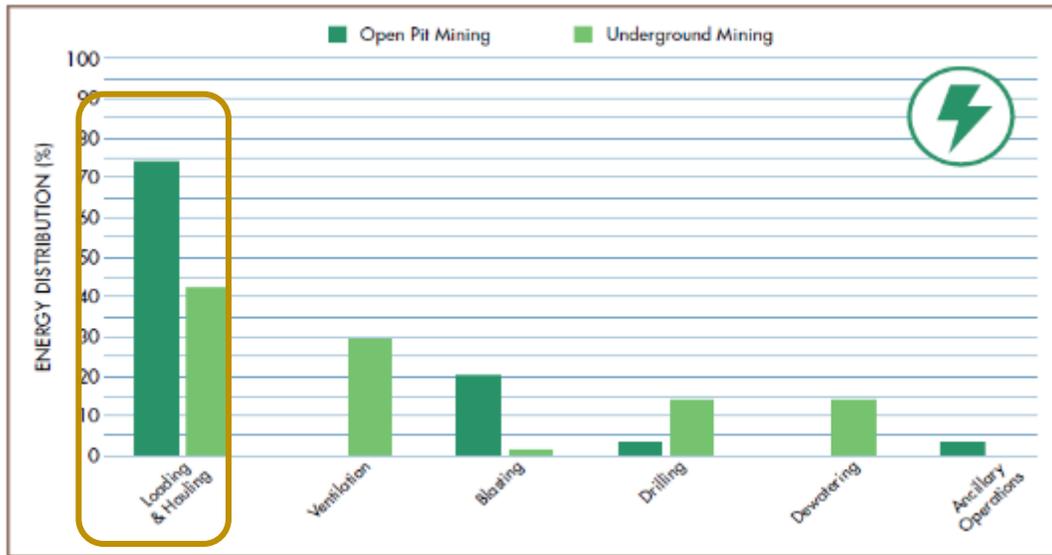


Ilustración 13. Distribución porcentual del consumo energético asociado a la extracción de cobre [7].

### 5.3.2 Medidas de Eficiencia Energética

#### 5.3.2.1 Implementación de mejoras de eficiencia energética en excavadoras hidráulicas. M3.1

##### Medida operacional

##### Medida de extracción, eléctrica

La excavadora hidráulica es ampliamente utilizada en el campo de la minería debido a su estrecha relación tamaño-potencia, estructura compacta y grandes fuerzas de actuación. Esta, se conforma por una bomba de desplazamiento variable impulsada por un motor diésel empleado normalmente como fuente de energía, además de válvulas que permiten controlar los actuadores. En estos sistemas, una o dos bombas suministran aceite a los actuadores distribuyendo el flujo por estrangulamiento, lo cual tiene un importante consumo energético. Con relación a la eficiencia, esta oscila alrededor de un 87% para el caso de las bombas, un 30% para el sistema de control hidráulico y un 90% para el sistema mecánico, obteniendo un consumo energético atribuible a la generación de trabajo de sólo un 23% respecto a la potencia del motor. Por otra parte, el rendimiento energético promedio de los motores bordea el 35%, por lo que la eficiencia global de la máquina es bastante reducida.

Para contrarrestar esta problemática, existen dos maneras de mejorar la eficiencia energética de estas maquinarias hidráulicas:

- 1) Mejorar el rendimiento que relaciona el concepto carga/motor
- 2) Reducir las pérdidas de aceleración.

Para llevar a cabo estas mejoras, se propone:

- Implementar un sistema basado en un motor eléctrico con conversión de frecuencia que accione la bomba hidráulica

- Implementar un sistema de control basado en el control segmentado de la velocidad y el desplazamiento continuo para una bomba de velocidad y desplazamiento variable en el caso que aplique
- Implementar un acumulador en la entrada de la bomba hidráulica para mejorar el rendimiento de la respuesta dinámica cuando el motor eléctrico arranque a plena carga o con una carga pesada
- Implementar un sistema de medición independiente de entrada y salida que permita reducir las pérdidas de aceleración

Fuente: [20].



Fuente: Construcción Minera

### 5.3.2.2 Optimización en trayectoria y velocidad de cubo en maquinarias de carguío. M3.2

#### Medida operacional

#### Medida de extracción

Como uno de los parámetros de medición de eficiencia energética para el proceso de carguío se encuentra el parámetro que relaciona la tasa de producción y la energía requerida para llevar a cabo la operación.

La producción por unidad de tiempo, o tasa de producción, es una función de las especificaciones de la máquina de excavación (por ejemplo, la capacidad de la cuchara y las velocidades de funcionamiento), las condiciones de operación (por ejemplo, la capacidad de excavación del material) y el diseño y la planificación de la mina (por ejemplo, las alturas de los bancos y la flota de camiones que operan en conjunto con la excavadora).

En cuanto al consumo energético, éste está determinado por el peso del material, la resistencia del material a la excavación (excavabilidad) y la trayectoria y velocidad del cubo. Por otra parte, algunos

de estos factores interactúan para afectar tanto la tasa de producción como el consumo energético, tal como ocurre con la variable operacional, la cual incide, por ejemplo, en el factor de llenado del cubo y en el tiempo de ciclo.

En lo que respecta la variable operacional dentro del proceso de carguío, esta puede presentar importantes ineficiencias energéticas causadas por prácticas inadecuadas en la operación. Las magnitudes asociadas a estas ineficiencias se pueden apreciar en la siguiente tabla, en la cual se aprecia que las operaciones realizadas de forma inadecuada o no optimizada pueden utilizar hasta un 40% más de energía por tonelada de producción en comparación con las operaciones implementadas correctamente.

Tabla 5. Ejemplos de ineficiencias energéticas asociadas a operaciones inadecuadas [21].

Ítem	Ineficiencia Observada	Comentario
<b>Eficiencia energética en el funcionamiento de la línea de arrastre (T/kWh)</b>	1,4 – 15,7%	Diferencia observada entre la mejor operación y las restantes
<b>Eficiencia energética del funcionamiento general de la pala</b>	5,3 – 15,0%	Diferencia observada entre la mejor operación y las restantes
<b>Eficiencia energética en el funcionamiento de la línea de arrastre (T/kWh)</b>	16,2 – 44,1%	Diferencia observada entre la mejor operación y las restantes
<b>Eficiencia energética del elevador de pala (t/kj) sólo durante la fase de excavación</b>	1,6 – 28,6%	Diferencia observada entre la mejor operación y las restantes

Las investigaciones que se han realizado en el último periodo demuestran que, durante la fase de carguío, los factores de mayor relevancia corresponden a la trayectoria del cubo empleada por el operador y la velocidad a la que éste realiza la operación. La parte frontal de una excavadora y el cubo de una draga se caracterizan por poseer un peso elevado, causa por la cual su desplazamiento suele generar un importante consumo energético. Por esta razón es que, al aumentar innecesariamente la trayectoria del cubo o su profundidad de corte, también aumenta el consumo energético de la operación. No obstante, las profundidades de corte superiores tienden a aumentar el factor de llenado del cubo y, por lo tanto, la productividad y la eficiencia energética del proceso.

En base a ambos efectos asociados a la variable trayectoria, se recomienda trabajar bajo una trayectoria optimizada con la cual se alcance la menor profundidad de corte y que a la vez permita obtener un factor de llenado adecuado del cubo.

En cuanto a la velocidad de operación, ésta es directamente proporcional al consumo de energía (la potencia es igual al producto de la fuerza y la velocidad), lo cual indicaría que la mejor condición es trabajar a bajas velocidades. No obstante, al aumentar la velocidad disminuyen los periodos de ciclo, lo que aumenta la productividad y por tanto el consumo energético global de la operación. Ambos efectos asociados a la variable velocidad sugieren realizar un proceso de optimización con el cual se obtenga la velocidad de trabajo que permita generar el mínimo consumo energético [21].

### 5.3.2.3 Implementación de Load-Haul-Dump (LHD) Híbrido. M3.3

#### Medida de diseño

#### Medida de extracción, transporte

Los equipos Load Haul Dump, o LHD, son cargadores articulados de bajo perfil implementados en minería subterránea para cargar y transportar los minerales. En la actualidad, existen dos tipos de LHD, clasificados según la tecnología con la cual opere el motor:

- 1) Equipos diésel, empleados desde 1960 y los que presentan una importante participación en la industria subterránea;
- 2) Equipos eléctricos, los que entraron al mercado en 1980 y cuya problemática que han presentado desde la fecha ha sido operar limitadamente a causa del cable de poder.

Ventajas de los equipos a diésel:

- Trabajan a mayores velocidades y menores tiempos de carga y descarga,
- Presentan flexibilidad operacional y autonomía de movimiento, por trabajar con una alta energía específica asociada al combustible (aproximadamente 13kWh/hg),
- Presentan bajo costo de inversión

Desventajas de los equipos a diésel:

- Altos niveles de contaminación acústica
- Baja eficiencia energética (los motores con mayor eficiencia llegan al 50%, mientras que la mayoría operan por debajo del 40%)
- Baja capacidad de sobrecarga
- Considerable requerimiento de mantención
- Costos operacionales que tienen a aumentar con los precios del petróleo, entre otros.

Ventajas de los equipos eléctricos:

- Cuentan con motores cuyo rendimiento se aproxima al 90%, por presentar un torque constante, incluido un alto torque a baja velocidad, lo cual genera una rápida respuesta a la carga y mejor capacidad de sobrecarga.
- El efecto altura incide con menor preponderancia en los motores eléctricos que en los motores diésel.

Desventajas de los equipos eléctricos:

- Restricciones asociadas al largo y tipo de cables de arrastre
- Requieren de instalaciones adicionales de suministro, transformación y tendido eléctrico, aumentando la inversión y costos de mantención
- Limitación en el número de equipos por unidad de alimentación

**Con el fin de crear sinergia entre la energía eléctrica y la energía que se extrae del petróleo, se ha creado el equipo LHD híbrido, cuyo accionamiento se basa en la utilización de motores a diésel y eléctricos.**

Beneficios asociados a esta tecnología híbrida:

- Mayores tasas de aceleración y desaceleración, generando tiempos de ciclo más acotados y por tanto aumentado el rendimiento de la operación

- El sistema eléctrico funciona parcialmente como sustituto del motor diésel, con lo cual es posible alcanzar una reducción de uso de combustible que se acerca al 30%
- Estos sistemas pueden recuperar energía de frenado para emplearla en el proceso de aceleración, mientras que la energía no utilizada es almacenada en un sistema de almacenamiento energético
- Tienen asociado menores costos de mantención y reparación gracias a la ausencia de componentes mayores como convertidor de torque y sistema de transmisión mecánica

El equipo híbrido al compararlo con equipos diésel, se obtienen las diferencias que se reflejan en la siguiente tabla [22]:

Tabla 6. Comparación de principales características de equipos diésel y LHD [22].

Ítem	Equipo Diésel	Equipo híbrido
<b>Costo operativo</b>	Caso base	Hasta 30% menor
<b>Uso de combustible</b>	50 Litros/hr	38 Litros/hr
<b>Costo de mantención</b>	160 USD/hr	100 USD/hr
<b>Confiabilidad</b>	Caso base	Disponibilidad hasta 10% mayor
<b>Requerimientos de ventilación</b>	100 cfm/HP	Hasta 33% menor



Fuente: UPS Battery Center

#### 5.3.2.4 Implementación de excavadoras hidráulicas híbridas. M3.4

##### Medida de diseño

##### Medida de extracción

Una excavadora hidráulica híbrida se caracteriza por contar con un sistema hidráulico donde acumuladores, en lugar de baterías, almacenan energía [23]. Concretamente, estas maquinarias híbridas permiten almacenar energía en los momentos en donde la maquinaria se ralentiza o se detiene, liberándola cuando ésta acelera. En una obra típica, una excavadora puede llevar a cabo repetidos ciclos de trabajo, lo que puede representar una significativa oportunidad de ahorro energético [24]. En efecto, con esta maquinaria es posible reducir el consumo energético aproximadamente en un 25% respecto a maquinarias de las mismas características pero que no son híbridas.

Actualmente, existen excavadoras hidráulicas híbridas que operan en base a un sistema de bombeo de pistones axiales que trabaja en conjunto con un sistema de control de variación de desplazamiento electrónico. En efecto, los dispositivos electrónicos monitorean la velocidad del motor y automáticamente ajustan el desplazamiento de la bomba con el fin de que la presión y el caudal se ajusten en función del requerimiento del sistema. Por otra parte, el control de la dirección del flujo se lleva a cabo mediante un Sistema de Control Adaptable (ACS) basado en una válvula que optimiza el rendimiento de la máquina al gestionar de forma inteligente los límites y caudales que controlan su movimiento [23].



Fuente: cat.com

### 5.3.3 Proyectos Implementados

<p><b>Mejora en gestión de proceso de carguío</b></p> <p>Caso: Rendimiento Palas. LOS PELAMBRES ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Aumento del rendimiento de palas debido al aumento del factor de carga y a la gestión del tiempo de ciclo de carguío. Se realizan cambio de baldes de las palas, la capacitación de los trabajadores, la implementación de pesómetros y visualización de pesómetro en pantalla.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>1.486 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 609 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Mejora en gestión de proceso de carguío</b></p> <p>Caso: Utilización palas hidráulicas. MINERA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Capacitaciones a operadores de palas hidráulicas. Así como generar operadores multipropósito para dar continuidad a la operación.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>311.902 l/año (diésel)</p> <p>Reducción emisiones: 933 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Mejora en descarga de ripios</b></p> <p>Caso: Mejora en Desempeño de Descarga de Ripios. MINERA ZALDIVAR ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Plan de mejoramiento en el manejo de ripios, incluyendo: unificar el corte de pila en rotopala, instalación de correas móviles, mejorar faldones en chutes de traspaso, estandarizar prácticas operacionales para los turnos, implementar pesómetro en rotopala nueva, revisar topografía de piso de calicatas y el apoyo de camiones CAEX y de Asercop</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>5.177 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 2.091 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Uso de IPCC</b></p> <p>Caso: IPCC (In-Pit Crushing and Conveying). Minera Sahuarita, Arizona, EEUU</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Una tecnología en aumento de acarreo de material en las minas son los sistema del tipo IPCC (In-Pit Crushing and Conveying), en las operaciones del tipo rajo abierto. Un ejemplo de este sistema es el de la Mina de cobre en Sahuarita, Arizona, donde se desarrolló un sistema de transporte existente basado en la trituración y transporte estacionario de mineral dentro de la mina. El sistema se compone de tres trituradoras giratorias móviles de 1,5 * 2,2 m (60-89 pulgadas), una unidad de transporte, apiladora móvil, y 7,3 km de correa transportadores con una potencia instalada de 14000 KW.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>Este sistema permitió a la mina reducir la flota de camiones en un 25%. Además, los requerimientos promedio de camiones se redujeron en un 37%.</p>	<p>Fuente caso:</p> <p><a href="https://www.researchgate.net/publication/270888181_Review_of_the_in-pit_crushing_and_conveying_IPCC_system_and_its_case_study_in_copper_industry">https://www.researchgate.net/publication/270888181_Review_of_the_in-pit_crushing_and_conveying_IPCC_system_and_its_case_study_in_copper_industry</a></p>

<p><b>Incorporación de Palas Eléctricas</b></p> <p>Minera</p> <p>Los Pelambres AN-TOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Incorporación de 2 palas eléctricas en Minera Los Pelambres. Los equipos P&amp;H modelo XPC-4100 de más de 21 metros de altura, similares a un edificio de seis pisos, permiten mejorar la productividad de carguío en un 15%, gracias a que tienen una capacidad de carga de 100 toneladas y una disponibilidad superior al 90%. En un turno se pueden llegar a realizar unas 180 cargas en cada uno de los 56 camiones de extracción minera con que cuenta Los Pelambres.</p> <p>La eficiencia energética se está enfocando en hacer más productivo el equipo con tecnología y servicio especializado, por lo cual tecnologías como el control adaptativo y todo el servicio de soluciones inteligentes se enfocan en el aumento de producción y con esto en un aumento en la eficiencia.</p>	<p>Fuente: Revista Minería Chilena</p> <p><a href="https://www.mch.cl/informes-tecnicos/motores-palas-electricas-mineria-consumos-maximos-llegan-a-casi-4-000-kw/">https://www.mch.cl/informes-tecnicos/motores-palas-electricas-mineria-consumos-maximos-llegan-a-casi-4-000-kw/</a></p> <p>Fuente: Revista Minería Chilena</p> <p><a href="https://www.mch.cl/reportajes/los-pelambres-incorporo-dos-nuevas-palas-electricas/">https://www.mch.cl/reportajes/los-pelambres-incorporo-dos-nuevas-palas-electricas/</a></p>
--	--	---

## 5.4 Transporte. *Transversal – Extracción en Seco*

### 5.4.1 Descripción

El proceso de transporte corresponde a la etapa en que se transporta el material extraído desde el punto de carguío hasta el chancador primario que da inicio al proceso de conminución o en su defecto a otros puntos como botaderos, entre otros. En procesos de mina a rajo abierto, este transporte se realiza primariamente mediante camiones comúnmente denominados CAEX (camiones de extracción), mientras en minas subterráneas existen transportes mixtos mediante CAEX y correas transportadoras.

En relación a los CAEX, estos son de gran tonelaje, y desplazan el material desde el frente de carguío a sus diferentes puntos de destino, los que corresponden a botaderos de estériles, acopios de mineral de baja ley, acopios de mineral de alta ley, entre otros, donde descargan el material retornando nuevamente a la operación de carguío.

Las etapas que considera el transporte de material son las siguientes:

1. Transporte de material a su punto de destino
2. Descarga de material
3. Retorno del equipo de transporte al punto de carguío (en el caso de ser requerido)

Como equipos complementarios en minería subterránea, se emplean las correas transportadoras, las que corresponden a rápidos y eficientes mecanismos de desplazamiento de material, las cuales se disponen por lo general en terrenos relativamente planos o con pendientes de hasta 18°.

### 5.4.2 Caracterización Energética

En minería subterránea, las maquinarias frecuentemente empleadas corresponden a camiones de bajo perfil eléctricos y a diésel, los que se caracterizan por transportar grandes cantidades de material por las galerías subterráneas. Dichos equipos se caracterizan además por poseer un alto rendimiento en labores horizontales, aceptando también el trabajo bajo pendientes suaves. Por otra parte, se encuentran los equipos Load-Haul-Dump (LHD), los que pueden cumplir con el objetivo de cargar el material como de transportarlo, y los cuales pueden ser equipos eléctricos o a diésel. Como

transporte complementario, se emplean además correas transportadoras, locomotoras diésel-eléctricas o sistemas eléctricos de extracción vertical (skips) [25], [26], [27].

En minería a rajo abierto, los equipos empleados corresponden usualmente a camiones convencionales cuya capacidad puede aceptar hasta 40 toneladas, y camiones fuera de carretera o camiones mineros cuya capacidad supera las 300 toneladas. Los camiones recientemente mencionados operan en base a combustible diésel, y se caracterizan por tener un sistema de transmisión eléctrica. Por otra parte, se encuentran los camiones articulados, los que consisten en una tolva unida por un sistema de articulación a la cabina del camión, y cuya fuente de energía corresponde a diésel.

A nivel energético, el proceso de transporte en conjunto con el proceso de carguío presenta el comportamiento que se muestra en la siguiente gráfica, la cual muestra la distribución porcentual del consumo energético asociado a la etapa de extracción de cobre, diferenciando el caso de minería a rajo abierto y minería subterránea. En esta gráfica, es posible apreciar que el porcentaje de consumo energético asociado al proceso carguío y transporte en minería a rajo abierto se acerca al 75% respecto al consumo total de energía asociado al proceso de extracción; en cuanto a la minería subterránea, ésta se aproxima al 43%.

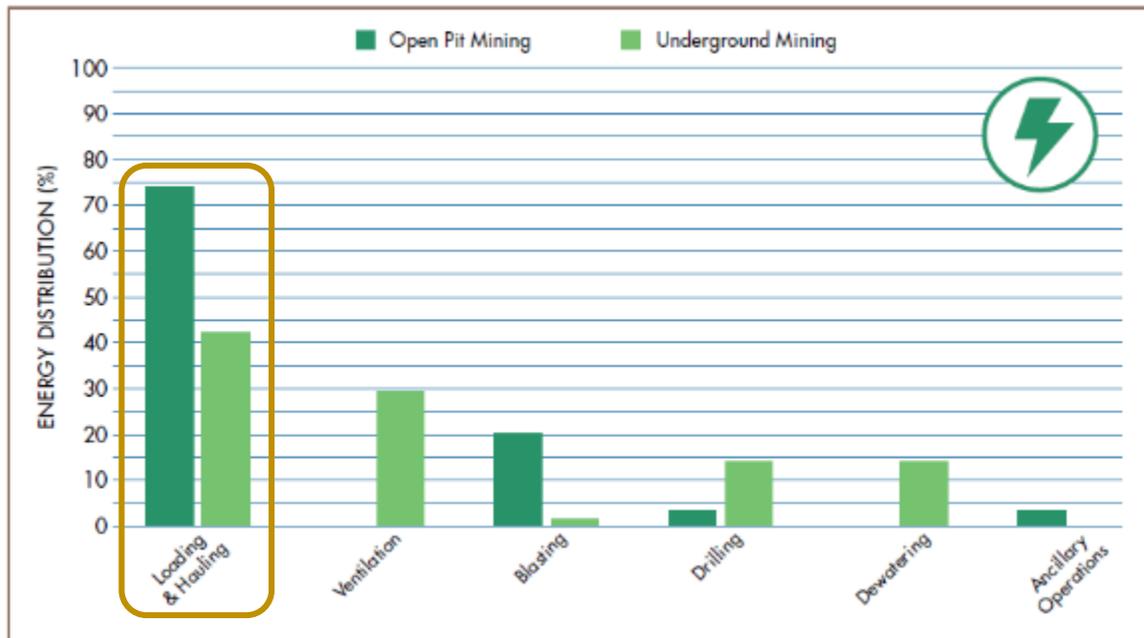


Ilustración 14. Distribución porcentual del consumo energético asociado a la extracción de cobre [7].

### 5.4.3 Medidas de Eficiencia Energética

#### 5.4.3.1 Optimización de parámetros operacionales en proceso de transporte. M4.1

##### Medida operacional

##### Medida de transporte

La energía consumida por una máquina de transporte minero que traslada una carga útil de un punto a otro depende del equipo, las condiciones de funcionamiento, la planificación y el diseño de la mina y del operador. Las características asociadas al equipo son la eficiencia del motor, la resistencia aerodinámica, el peso del vehículo vacío, la eficiencia del frenado regenerativo (cuando

aplique), la carga útil máxima y la potencia y velocidades máximas del motor. Las condiciones de funcionamiento pertinentes son la resistencia al rodamiento de las carreteras de transporte, la flota desplegada, el sistema de descarga y los límites de velocidad. Algunas de estas condiciones operativas están controladas, al menos en parte, por la planificación y el diseño de la mina. Entre ellas se incluyen la resistencia a la rodadura (que está determinada por el tipo de revestimiento de las carreteras y las prácticas de mantenimiento de aquéllas), el perfil de las carreteras de transporte, la flota asignada y los límites de velocidad. En cuanto a los operadores, estos desempeñan un papel fundamental en la determinación de la eficiencia energética de las operaciones de transporte ya que influyen en parámetros de entrada claves que incluyen la carga útil (que depende principalmente del operador de la cargadora), las velocidades de operación (las velocidades reales y las estrategias de aceleración y desaceleración) y las estrategias de cambio de marchas.

A continuación, se presenta la ecuación de potencia con la cual opera una maquinaria de transporte, donde P es la potencia, D es la distancia recorrida, V es la velocidad de operación, W es el peso de la maquinaria (incluyendo el peso de la carga en el caso que aplique), a es una constante asociada a la resistencia aerodinámica mientras que b representa las resistencias de rodadura, fricción y grado.

$$P = V(aV^2 + bW) + \frac{0,5WV^3}{D}$$

Como es posible desprender de la ecuación, el incremento de cargas útiles aumenta la potencia requerida y por tanto el consumo energético, no obstante, esto también trae consigo el aumento de la tasa productiva dentro de la mina. En efecto, en investigaciones realizadas se observaron que al aumentar la carga útil la eficiencia del combustible incrementó de 0,595 a 0,637 T/L, lo que equivale a un 7%. Asimismo, el aumento de la velocidad de desplazamiento trae asociado consigo un aumento de la energía consumida y a la vez un aumento de la producción. Este efecto combinado indica que, inicialmente la eficiencia energética del proceso aumentará hasta alcanzar el nivel óptimo y luego disminuirá con nuevos aumentos de velocidad. Por tanto, los límites de velocidad en las minas deberían determinarse en función del tipo y tamaño de los camiones, de forma de aproximarse a los puntos óptimos y de esta forma aumentar el rendimiento energético del proceso. En este sentido es necesario comprender que trabajar con parámetros y condiciones óptimas bajo diferentes escenarios puede generar un aumento importante de la eficiencia energética. Por ejemplo, se ha demostrado que en las pendientes que no presentan importantes variaciones, operar a velocidades aproximadamente constantes maximiza la eficiencia energética del proceso de transporte. Por otra parte, también es importante elaborar estrategias óptimas de control del cambio de marchas para reducir el consumo de combustible y los tiempos de ciclo. De hecho, se ha demostrado que el uso de estrategias óptimas de cambio de marchas para unas mismas condiciones del ciclo de conducción puede suponer un ahorro de hasta el 6,5% en el consumo de combustible [21].



Fuente: Revista Minería Chilena

#### 5.4.3.2 Implementación de un sistema de gestión de flotas. M4.2

##### Medida operacional

##### Medida de transporte

Se recomienda implementar un Sistema de Gestión de Flotas, el que corresponde a un sistema basado en softwares y hardwares que trabajan en tiempo real para automatizar y optimizar los procesos de transporte y carguío minero. En efecto, un Sistema de Gestión de Flotas permite incrementar la productividad de la flota minera a través de una administración inteligente de carga, minimizando tiempos muertos, planificando la producción y generando reportes en tiempo real; asimismo, permite reducir costos operacionales y de mantenimiento mediante la monitorización de conducción de la maquinaria y de las condiciones en las cuales se encuentra. Por último, permite optimizar los parámetros que permiten definir el vehículo y ruta apropiados para desempeñar el carguío y transporte de carga [28].

Algunas de las tareas que permite desempeñar el Sistema de Gestión de Flotas son:

1. Seleccionar de forma automática la ruta más corta y menos congestionada
2. Monitorizar parámetros críticos de equipamiento minero y operación
3. Identificar ubicaciones de maquinarias en terreno
4. Asignación dinámica de equipamiento según tarea a desempeñar
5. Abrir y cerrar rutas

En general, la tecnología en sí consiste en:

1. Uso de tablets y uso de GPS de baja precisión a bordo de la maquinaria

2. Sistema de transmisión inalámbrico
3. GPS de alta precisión para el guiado de maquinaria y control de dilución en palas y perforadoras
4. Servidores
5. Software de Sistema de Gestión de Flotas desplegado en el servidor central y en cada terminal de equipo de minería o apoyo.

Concretamente, un sistema de gestión de flotas opera principalmente en base a dos configuraciones:

- 1) asignación fija de camiones
- 2) asignación flexible de camiones.

En la primera, al principio de cada turno un grupo de camiones es asignado a una ruta en particular, en la cual deben trabajar durante todo el periodo del turno. En la asignación flexible de camiones, por otra parte, varios camiones disponibles en la flota se asignan a una pala de trabajo específica al comienzo del turno; sin embargo, esos camiones, en lugar de estar al servicio de una sola pala o ruta durante el turno, reciben una nueva asignación del sistema de despacho cada vez que se carguen y se vuelquen en los destinos de descarga.

Al comparar ambas estrategias, se ha observado que la asignación flexible de camiones mejora la productividad de la operación en un alto porcentaje. Investigaciones reportan un aumento de la tasa de producción asociada a la asignación flexible de camiones que varía entre un 10% y un 15% respecto a un sistema sin gestión de flotas, y al compararlo con una asignación fija de camiones, esta suele tener asociado un aumento de productividad de un 8% mayor [29]. Por esta razón, se recomienda implementar un sistema de gestión de flota basado en una asignación flexible de camiones.



### 5.4.3.3 Incorporación de sistema Trolley Assist. M4.3

#### Medida de diseño

#### Medida de transporte

Los sistemas de trolley para camiones, los cuales permiten sustituir parcialmente el combustible diésel por electricidad, pueden ser una real alternativa para futuros desarrollos en el ámbito minero. Tales equipos se abastecen fundamentalmente de energía eléctrica proveniente de una subestación, siendo dicha energía transmitida a través de una catenaria hacia los motores de accionamiento del camión. En la actualidad, la infraestructura de un sistema trolley completo consiste en un sistema de catenaria, subestaciones de tracción, un carro montado en un mástil de suministro de alta tensión, suministro de alto voltaje montado en mástil, e iluminación del sistema de catenaria. Esta infraestructura por lo general se instala para dar soporte a trayectos cuesta arriba [30].

Los beneficios asociados a este sistema se resumen en [31]:

- Minimización de consumo de combustible diésel. Los recorridos extensos y las gradientes en dichas trayectorias ofrecen una oportunidad para el transporte asistido con trolley. En efecto, bajo pendiente el consumo de combustible puede reducirse en un 80%.
- Capacidad de producción incrementada de la mina (20% más) y reducción en el número de camiones debido a la mayor velocidad de transporte.
- Mayor accesibilidad a las partes más remotas de la mina, debido a que los camiones con sistema trolley son capaces de enfrentar mayores pendientes y operar con carga completa por periodos prolongados.
- Reducción de costos de mantención asociado a motores diésel, los que frecuentemente sufren mayor desgaste al operar a carga completa bajo pendientes positivas.
- Aumento de la disponibilidad y disminución de los costos del ciclo de vida para el motor diésel (menos horas de funcionamiento).
- Mayor retorno de la inversión. Cuando se utiliza la capacidad del trolley assist, el retorno de la inversión se puede conseguir entre 1 a 3 años.

Asimismo, estos sistemas podrían incorporar un sistema de regeneración de energía que opere en las instancias en las cuales el camión se encuentre en pendientes negativas. Concretamente, el sistema podría diseñarse de tal forma de regenerar energía proveniente del proceso de frenado, lo cual podría lograrse mediante la transformación de una subestación unidireccional tradicional en una reversible. Así, la energía generada podría ser utilizada para el transporte de otras cargas o ser utilizada por la red de suministro eléctrico [30].



Fuente: Revista Minería Chilena

#### 5.4.3.4 Implementación de Sistema In-Pit Crushing and Conveying (IPCC). M4.4

##### Medida de diseño

##### Medida de transporte

Uno de los problemas más complejos de la explotación minera a cielo abierto es la elección de la flota óptima de excavadoras y camiones. Este sistema por lo general comprende unidades de carga y transporte discretas cuyas salidas se caracterizan por sus tiempos de ciclo, y cuyos costos operacionales suelen ser elevados. De hecho, los costos de combustible diésel para un tractor son significativos, oscilando incluso entre un 15% y el 35% de los costos de servicios de la instalación [32]. Como alternativa a este sistema convencional, se encuentra el sistema In-Pit Crushing and Conveying (IPCC), el que corresponde a un sistema de procesamiento continuo que incluye palas, chancadores, esparcidores y transportadores mediante correas, y cuyo fin es equivalente al sistema convencional de carguío y transporte pala-camión, es decir, transportar el material a sus puntos de destino, pero mediante un mecanismo de trabajo continuo basado en correas transportadoras [33]. Como parte de los beneficios de los sistemas IPCC se encuentran los potenciales ahorros derivados de la reducción del consumo de petróleo, además de consumir menos energía por unidad de peso de material transportado en comparación a los camiones. Cabe señalar que las correas transportadoras tienen asociado un rendimiento energético superior (81%) respecto a los camiones (39%). En efecto, se estima que el OPEX del transporte por correas puede ser aproximadamente un tercio del transporte por camión [34].

Como se menciona previamente, el transporte del material se lleva a cabo mediante correas transportadoras, para lo cual previamente se realiza un proceso de chancado de material con el fin de

obtener tamaños de partículas inferiores a 300 mm y así permitir un traslado de material efectivo. Respecto a los sistemas de chancado, estos pueden tener tres modalidades de portabilidad: totalmente móvil, semimóvil y fijo. Los sistemas IPCC totalmente móviles utilizan una chancadora que es fácilmente transportable, siguiendo la trayectoria de trabajo para ser alimentada directamente por las excavadoras, lo cual permite eliminar la necesidad de camiones de transporte. La trituración semimóvil, por otro lado, utiliza tanto las operaciones convencionales como las asociadas al IPCC para la excavación y el transporte de materiales. En este caso, se emplean camiones para descargar el material excavado en sistemas de trituración semimóviles, los que alimentan posteriormente las cintas transportadoras. Por último, los sistemas fijos no se mueven del lugar durante la vida útil de la mina, y suelen permitir mayor capacidad de chancado y por tanto mayor productividad, sin embargo, la menor flexibilidad de posicionamiento implica que el sistema es más intensivo en camiones de transporte [35].

Dado que el sistema IPCC es poco usado y limitado a cierto tipo de yacimientos, es necesario tener presente los factores que inciden en su desarrollo. Algunos de dichos factores se mencionan a continuación [36]:

1. La tasa de movimiento anual de material debe ser lo suficientemente grande como para lograr abatir el alto CAPEX asociado al sistema. Según investigaciones, este tonelaje debe superar los 25 millones anuales como referencia.
2. El sistema solo será factible si logra reemplazar la suficiente cantidad de camiones que justifique su inversión inicial, si el ciclo de acarreo promedio de la flota de camiones es mayor a 25 minutos, pudiendo de esta forma evaluar la posibilidad de implementarse.
3. Por tratarse de un sistema con una alta inversión, se sugiere implementarlo en minas con vida operacional prolongada, con el fin de recuperar el CAPEX y reducir el OPEX. Por lo general, se requiere de 5 a 6 años para recuperar la inversión inicial.
4. Debe tomarse en consideración el ratio que relaciona el costo de electricidad respecto al diésel, con el fin de evaluar si se justifica la implementación de un sistema IPCC. En el caso de obtener un valor bajo, el sistema indicaría ser competitivo.
5. Otro factor relevante es la dureza del material a trasladar, para lo cual se requiere de un modelo geomecánico robusto que represente de manera fidedigna el comportamiento y propiedades del yacimiento (abrasividad, distribución de tamaños, dominios geológicos, otros), para de esta forma seleccionar la chancadora adecuada.
6. El IPCC requiere de un robusto sistema de control operacional y con personal altamente calificado. Concretamente, se debe tener especial cuidado para establecer un sistema de control geológico, con la capacidad de anticipar posibles cambios de las propiedades de la roca que puedan comprometer la planificación y las operaciones de la mina. Por esta razón es que la geología, la planificación y supervisión de operaciones deben estar correctamente alineadas e integradas con los requerimientos del IPCC.
7. El sistema IPCC trabaja de manera óptima si el número de destinos es mínimo. De esta manera, al reducir las reubicaciones y paradas operativas, se maximiza la disponibilidad y utilización del sistema.



Fuente: Metso Outotec

#### 5.4.4 Proyectos Implementados

<p><b>Incorporación de aditivo a combustible diésel</b></p> <p>Caso: Incorporación Aditivo a combustible Diésel</p> <p>MINERA ESCONDIDA BHP</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Durante el proceso de licitación de suministro de combustibles a ESCONDIDA, se solicitó al proveedor incorporar un aditivo al diésel que, conforme a pruebas y aplicaciones en Australia, podrían obtenerse ahorros de consumo de entre un 2% a 8%. Se incorporó en forma escalonada el aditivo al diésel hasta alcanzar 280 ppm cada 10 m3. Durante 2019 se realizó seguimiento y control durante 8 meses a un grupo de 5 camiones de la Flota de CAEX, lo que permitió analizar y medir los ahorros en diésel para ESCONDIDA.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>2.0% reducción en promedio de consumos de diésel 7.200 m3/año</p>	<p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf</a></p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero.</p>
<p><b>Cambio de flota de camiones</b></p> <p>Caso:</p> <p>Cambio de flota camiones mina.</p> <p>BHP</p> <p>SPENCE</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Se evidencia un alto consumo de petróleo en flota de camiones extractores. Se realiza un cambio de flota de camiones a 4 camiones eléctricos. Inicialmente, se cambiaron 15 unidades de la flota total (40). El tonelaje por mover aumenta de 225 ton a 353 ton. Se estima un ahorro de un 7% en combustible para camiones y traslado de mineral al año.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>26.504.141 KWh/año</p>	<p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf</a></p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo</p>

	<p><b>Medida:</b></p> <p>Incorporación de camiones autónomos en mina Gaby (división Gabriela Mistral) con un total de 18 en operación. Con esta implementación, Gaby se transformó en la primera operación que realiza todo el proceso de transporte de minerales con el 100% de sus camiones en forma autónoma, guiados a través de un sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System). El uso de este tipo de camiones permite una baja en los costos asociados al rendimiento de los camiones, pues al operar a una velocidad constante, logran un ahorro de combustible y un menor desgaste de los neumáticos. En este punto,</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>Se estima que al menos reducciones entre 10% y 25% de combustible.</p>	<p><b>Citar</b></p> <p><b>Fuente:</b></p> <p><a href="https://www.mch.cl/informes-tecnicos/camiones-autonomos-la-experiencia-en-australia-y-chile/">https://www.mch.cl/informes-tecnicos/camiones-autonomos-la-experiencia-en-australia-y-chile/</a></p>
<p><b>Incorporación de camiones autónomos</b></p> <p>Caso: Minera Gaby Codelco</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Optimización del trayecto de los camiones, implementación de comedor móvil, auditoría al despacho mina con plan de acción para estandarizar turnos, reducción en el cambio de turno, gestión en mejora de caminos.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>2.160.777 l/año (diésel)</p> <p>Reducción emisiones: 6.461 tCO<sub>2</sub>e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía</p> <p>Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Implementación de un sistema de gestión de flotas</b></p> <p>Caso: Reducción Consumo Combustible CAEX .MINERA ANTUCOYA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Realizar gestión en el envío de CAEX a recarga de combustible, buscando minimizar los tiempos de espera asociados al abastecimiento.</p> <p>Reponer sensores de llenado de combustible durante detenciones programadas y crear avisos por SAP para reponer sensores.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>77.119 l/año (diésel)</p> <p>Reducción emisiones: 231 tCO<sub>2</sub>e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía</p> <p>Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</a></p>
<p><b>Implementación de un sistema de gestión de flotas</b></p> <p>Caso: Optimización de asignación de CAEX a palas.</p> <p>DIVISION ANDINA CODELCO</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>Ahorro de diésel por equipos CAEX que funcionan en vacío mientras esperan a ser cargados y ahorro de electricidad por el funcionamiento de palas en vacío. Se implementó el software Dispatch para optimizar la asignación de CAEX a palas. Andina 2015</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero- CODELCO</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</a></p>

<p><b>Aumento de factor de carga CAEX</b></p> <p>Caso: TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>El 47% del consumo de diésel está destinado al transporte de material, en una flota de 10 camiones donde cada uno transporta 188,5 ton/viaje. Se quiere aumentar el factor de carga de estos camiones sin dañarlos, con la finalidad de transportar mayor carga y disminuir los viajes. La medida consiste en aumentar el factor de carga en al menos 1 tonelada por camión, lo que generaría una disminución en los viajes y con esto un menor consumo de diésel. Para esto, se utilizó el sistema de manejo de flotas, que sincroniza a las unidades y despachadores permitiéndoles conocer información necesaria para obtener el factor de carga en tiempo real, de manera de tomar decisiones que permitan optimizar el carguío y el transporte.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>Reducción energía: 2 [TJ]</p> <p>Reducción emisiones gases: 176 [tCO<sub>2</sub>-2]</p> <p>Ahorro: 37.519 [USD/año]</p> <p>Costo: Sin costos asociados. Gestión operacional en la mina.</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero</p> <p>TECK RESOURCES CHILE. 2020</p> <p><a href="https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/transporte_EE_Teck2019.pdf">https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/transporte_EE_Teck2019.pdf</a></p>
<p>Incorporación de camiones trolley.</p>	<p><b>Medida:</b></p> <p>La Mina de cielo abierto Aitik, en Suecia, con el apoyo de la Agencia Sueca, está instalando sistemas “trolley Assist” Las características de este sistema de manejo es que permite aprovechar directamente la energía eléctrica. En algunas partes del mundo la energía eléctrica se puede generar a bajo costo y con bajas emisiones, dependiendo de la fuente del combustible. Los sistemas de trolley para camiones, que buscan sustituir al combustible diésel por electricidad, pueden ofrecer una alternativa para futuros desarrollos. En lugar de generar electricidad a partir del motor diésel y del generador eléctrico en el camión, aquí se abastece a partir de una subestación y se transmite a través de una catenaria a los motores de accionamiento en el camión.</p> <p><b>Ahorro:</b></p> <p>De acuerdo a lo estimado para Aitik, esta implementación podría significar una reducción de un de GAE 15%, en el ciclo de vida de esta mina y una reducción de consumo de diesel en 5.500 m<sup>3</sup> / año.</p>	<p>Fuente:</p> <p><a href="https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/">https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/</a></p> <p>Caso:</p> <p><a href="https://im-mining.com/2019/10/24/boliden-ba-cks-trolley-assist-haulage-aitik-kevitsa/">https://im-mining.com/2019/10/24/boliden-ba-cks-trolley-assist-haulage-aitik-kevitsa/</a></p> <p>imagen:</p> <p><a href="https://www.pinterest.cl/pin/519462138245110053/">https://www.pinterest.cl/pin/519462138245110053/</a></p>

## 6 Bibliografía

- [1 M. Rojas, «Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la ] minería de cobre a cielo abierto,» 2009.
- [2 C. Karpuz, «Energy Efficiency of Drilling Operations,» 2017.  
]
- [3 Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006.  
]
- [4 «Mining And Construction,» [En línea]. Available:  
] <https://miningandconstruction.com/mining/undergroundmining/efficiency-as-strong-as-iron-2607/>. [Último acceso: 2020].
- [5 «Revista Seguridad Minera,» [En línea]. Available:  
] <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/perforacion-minera-tipos-clases-de-maquinaria-y-ubicacion-de-taladros/>. [Último acceso: 2020].
- [6 M. Mansouri, «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Two-AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a\\_fig6\\_296474523](https://www.researchgate.net/figure/Two-AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a_fig6_296474523). [Último acceso: 2020].
- [7 The Warren Centre, «Zero Emission Copper Mine of the Future,» 2020.  
]
- [8 Ingeopres, «Perforación y Voladuras,» España, 2011.  
]
- [9 J. Bernaola, J. Castilla y J. Herrera, «Perforación y voladura de rocas en minería,» Departamento ] de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid, 2013.
- [1 J.B. Segui y M. Higgings, «Blast design using measurement while drilling parameters,» *Fragblast*: 0] *International Journal for Blasting and Fragmentation*, pp. 287-299, 2002.
- [1 «Minería Chilena: Fragmentación y tronadura - Optimización energética de operaciones ] 1] mineras,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/#>. [Último acceso: 2020].
- [1 A. Aguirre, «Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía ] 2] en sociedad contractual minera El Abra,» Santiago de Chile, 2016.
- [1 Singh, «New trends in drilling and blasting technology,» *International Journal of Surface Mining,* ] 3] *Reclamation and Environment*, pp. 305-315, 2000.
- [1 Babaei Khorzoughi Mohammad y Hall Robert, «Processing of measurement while drilling data ] 4] for rock mass,» *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.

- [1 G. N. Moraga Hidalgo, «Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la 5] tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto,» Concepción, Chile, 2018.
- [1 Greg Adel, Toni Kojovic y Darren Thornton, «Mine-to-Mill Optimization of Aggregate 6] Production,» 2006.
- [1 H. González, «Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un 7] plan de producción en minería a cielo abierto,» Santiago de Chile, 2017.
- [1 J. Ortiz, «Apuntes de Curso de Explotación de Minas,» Santiago de Chile. 8]
- [1 Sandvik, «Rock Technology,» [En línea]. Available: [https://www.rocktechnology.sandvik/es-9\] la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/](https://www.rocktechnology.sandvik/es-9] la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/). [Último acceso: 2020].
- [2 Lei Ge, Long Quan, Xiaogang Zhang, Zhixin Dong y Jing Yang, «Power matching and energy 0] efficiency improvement of hydraulic excavator driven with speed and displacement variable power source,» *Chinese journal of mechanical engineering*, 2019.
- [2 Kwame Awuah-Offei, «Energy efficiency in mining: areview with emphasis on the role of 1] operators in loading and hauling operations,» USA, 2016.
- [2 G. Rojas, «Introducción de un LHD híbrido a la industria minera y sus posibilidades en el mercado 2] chileno,» Santiago de Chile, 2017.
- [2 R. Solorzano, «Caterpillar impacta con su excavadora híbrida,» 2016. [En línea]. Available: 3] <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886621/caterpillar-impacta-con-su-excavadora-hibrida#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20h%C3%ADbrida%20es%20sin%C3%B3nimo,combusti%C3%B3n%20suplementado%20por%20potencia%20el%C3%A9ctrica.&text=Aug%20>
- [2 «Revista Maquinaria Pesada,» 2013. [En línea]. Available: 4] <http://revistamakinariapesada.com/caterpillar-entrego-su-primera-excavadora-hibrida-en-bauma-2013/>. [Último acceso: 2020].
- [2 Ferrostaal, «Ferrostaal,» [En línea]. Available: [https://www.ferrostaal.com/es/referencias-5\] ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/](https://www.ferrostaal.com/es/referencias-5] ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/). [Último acceso: 2020].
- [2 Chang Ja Kim, «Diseño y evaluación técnico económica de un nuevo sistema de carguío y 6] transporte para la minería de hundimiento,» Santiago de Chile, 2009.
- [2 R. Castro, «Sistemas de Extracción Vertical,» Santiago de Chile. 7]
- [2 E. Cornejo, «Sistema de optimización de transporte para la mediana minería,» Chile, 2013. 8]

[2 A. Moradi Afrapoli y H. Askari-Nasab, «Mining fleet management systems: a review of models 9] and algorithms,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017.

[3 Minería Chilena, «El caso de Trolley Assist,» 2012. [En línea]. Available: 0] <https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/>.

[3 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-1-aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#>.

[3 Mikhailov, «A potencial application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat 2] mining,» 2019.

[3 Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi y Seyed Farhad Moosakazemi, 3] «Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry,» 2011.

[3 M. Nehring y P. Knights, «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing 4] and conveying, and truck/shovel systems,» 2017.

[3 J. Tonge, «The implications of improved conveyor technology on In-Pit Crusher Conveyor 5] Systems,» 2017.

[3 W. Loli Morales, «Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de 6] un pit crusher and conveyors,» Santiago de Chile, 2016.

[3 INACAP, «Extracción Mina». 7]

[3 Jack de la Vergne, «Diccionario Técnico de Mineros y Petroleros,» 2012. 8]

[3 T. Masquimillan, «Harneros,» [En línea]. Available: 9] <https://es.slideshare.net/tomasgmp/harneros>. [Último acceso: 2020].

[4 P. Navarro, «Slide Share,» [En línea]. Available: 0] <https://es.slideshare.net/BrunoVillanueva/30712-materialdeestudiopartei-diap180>. [Último acceso: 2020].

[4 Balasubramanian, «Size reduction by crushing methods,» Mysore. 1]

[4 J. Jeswiet y A. Szekeres, «Energy Consumption in Mining Comminution,» Canadá, 2016. 2]

[4 Mackorn, «Mackorn Products,» [En línea]. [Último acceso: 2020]. 3]

[4 Rivet, «Catálogo Rivet,» 2006. [En línea]. 4]

[4 J. Sandoval, «Mejoramiento Plan de Mantenimiento Área Seca, Chancado Fino, Gerencia de  
5] Mantención Cátodos, Minera Escondida Limitada,» Concepción, Chile, 2015.

[4 Salas Hnos Ltda, «Catálogo Ingeniería y Construcciones Salas Hnos Ltda,» Santiago de Chile.  
6]

[4 Codelco, «Lixiviación,» Chile, 2019.  
7]

[4 Dirección de Estudios y Políticas Públicas, «Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética  
8] en Minería».

[4 Cochilco, «Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019,» 2020.  
9]

[5 B. Valenzuela, «Balance Térmico de Soluciones Asociadas al Circuito SX-EW,» 2012.  
0]

[5 «Minería Chilena,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-1-especifico-de-energia/#>. [Último acceso: 2020].

[5 R. Sabbagh, «Theoretical and Experimental Investigation of Hydrocyclone Performance and the  
2] Influence of Underflow Pumping Effect,» 2015.

[5 Gaines, Energy and Materials Flow in the Copper Industry, 1980.  
3]

[5 Ministerio de Energía y Minas, «Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de  
4] diagnóstico energético,» Perú.

[5 Portal Minero, «Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras II,» Portal Minero Ediciones, Chile.  
5]

[5 G. Aravena, «Slide Share,» [En línea]. Available:  
6] <https://es.slideshare.net/GabrielAravena/167573358-espesamientoyfiltrado>. [Último acceso:  
2020].

[5 Universidad de Chile, «Separación sólido - líquido,» Santiago de Chile.  
7]

[5 G. Riveros, «Fundamentos de Metalurgia Extractiva,» 2010.  
8]

[5 U.S. Department of Energy, «An assessment of energy requirements in proven and new copper  
9] processes,» University of Utah, 1980.

[6 G. Riveros, «Pirometalurgia,» Universidad de Chile, 2009.  
0]

[6 Comisión Chilena del Cobre, «Tecnología en fundiciones de cobre,» Chile, 2015.

1]

[6 Metso, «Chancador Giratorio Primario,» [En línea]. Available:

2] <https://www.metso.com/es/productos/chancadores/chancadores-giratorios-primarios/chancador-giratorio-primario-superior/chancador-giratorio-primario-superior-60-110e/>. [Último acceso: 2020].

[6 McLanahan, «Zarandas Vibratorias,» [En línea]. Available:

3] <https://www.mclanahan.com/es/productos/zarandas-vibratorias>. [Último acceso: 2020].

[6 Minera Cerro Verde, «Chancado Primario Sociedad Minera Cerro Verde,» [En línea]. Available:

4] <https://i.ytimg.com/vi/w8j1k5eeoNg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].

[6 SPD, «Minera Tres Valles recibe fondo de Anglo American para impulsar proyectos,» [En línea].

5] Available: <https://southpacificdrilling.com/minera-tres-valles-recibe-fondos-de-anglo-american-para-impulsar-proyectos/>. [Último acceso: 2020].

[6 Minería Chilena, «Características de plantas SX pequeñas y medianas,» [En línea]. Available:

6] <https://www.mch.cl/reportajes/caracteristicas-de-plantas-sx-pequenas-y-medianas/#>. [Último acceso: 2020].

[6 Camiper, «Metalurgia: ¿Qué es la electroobtención y para qué sirve?,» 2019. [En línea].

7] Available: <https://camiper.com/tiempominero/wp-content/uploads/2019/10/metalurgia-electroobtencion.jpg>. [Último acceso: 2020].

[6 Rumbo Minero, «Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino,» [En

8] línea]. Available: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>. [Último acceso: 2020].

[6 Minería Chilena, «Sensores de vanguardia para optimizar la flotación de concentrados,» [En

9] línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/highservice-sensoflot-sensores-vanguardia-optimizar-la-flotacion-concentrados/>. [Último acceso: 2020].

[7 Federación Minera, «Antofagasta Minerals definiría sus inversiones el 2017,» [En línea].

0] Available: <http://www.federacionminera.cl/antofagasta-minerals-definiria-sus-inversiones-el-2017/>. [Último acceso: 2020].

[7 Metso, «Horno térmico Grate Kiln Indurating Machine,» [En línea]. Available:

1] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1294367.html>. [Último acceso: 2020].

[7 Britannica, «Roasting, smelting, and converting,» [En línea]. Available:

2] <https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-converting>. [Último acceso: 2020].

[7 Consejo Minero, «Buenas Prácticas: Tostación en lecho fluidizado,» [En línea]. Available:

3] <https://i.ytimg.com/vi/8LCdB8sYqOg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].

- [7 Minería Chilena, «Fundiciones de cobre en Chile,» [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1\\_Caletones.jpg](https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg). [Último acceso: 2020].
- [7 Nueva Minería y Energía, «Fundición de Concentrados de Chuquicamata lleva adelante cinco proyectos de mejora,» [En línea]. Available: <https://www.nuevamineria.com/revista/fundicion-de-concentrados-de-chuquicamata-lleva-adelante-cinco-proyectos-de-mejora/>. [Último acceso: 2020].
- [7 Minería Chilena, «Innovación permite reducir generación de scrap durante la electrorrefinación,» 6] [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2014/05/earless-1-ok-620x403.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [7 K. Shah, «Construction, Working and Maintance of Crusher for Crushing Bulk Materials,» 2018. 7]
- [7 M. Moncada Merino, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio de harnero 8] vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos,» Concepción, 2017.
- [7 D. Escobar Moscoso, «Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero 9] vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos,» 2016.
- [8 J. Saavedra Vidal, «Control de presión de agua mediante variador de frecuencia y motobomba,» 0] 2007.
- [8 Electro Industria, 2017. [En línea]. Available: 1] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&ni=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vgf>. [Último acceso: 2020].
- [8 Vibra Screener, 2016. [En línea]. Available: [https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2\] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/](https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/).
- [8 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3\] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/](https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/).
- [8 M. Acuña Reyes y A. Arancibia Reyes, «Patentscope,» 2013. [En línea]. Available: 4] <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2013049953>.
- [8 Minería Chilena, «Innovador proyecto permite a Radomiro Tomic ahorrar hasta 80% en uso de 5] agua,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/2018/07/17/innovador-proyecto-permite-a-radomiro-tomic-ahorrar-hasta-80-en-uso-de-agua/>.
- [8 Expande, «Casos de innovación de proveedores en la minería chilena,» 2018. 6]
- [8 Fenercom, «Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial,» 2017. 7]

[8 USAID, «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor,» 2011.  
8]

[8 Agencia de Sostenibilidad Energética, «Guía para calificación de consultores en Eficiencia  
9] Energética,» 2011.