



Reporte Energía en Minería Hidrometalurgia

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

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	PROYECTO EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA.....	5
2	CONTEXTO Y ANTECEDENTES	5
2.1	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	6
3	ENERGÍA EN MINERÍA	7
4	ESTADÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN MINERÍA	7
5	PROCESOS MINEROS	10
5.1	CONMINUCIÓN. <i>LÍNEA HIDROMETALÚRGICA</i>	10
5.1.1	<i>Chancado</i>	10
5.1.2	<i>Separación en Seco</i>	13
5.1.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	15
5.1.4	<i>Proyectos Implementados</i>	30
5.2	LIXIVIACIÓN. <i>LÍNEA HIDROMETALÚRGICA</i>	33
5.2.1	<i>Descripción</i>	33
5.2.2	<i>Caracterización Energética</i>	34
5.2.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	36
5.2.4	<i>Proyectos Implementados</i>	39
5.3	EXTRACCIÓN POR SOLVENTES. <i>LÍNEA HIDROMETALÚRGICA</i>	40
5.3.1	<i>Descripción</i>	40
5.3.2	<i>Caracterización Energética</i>	41
5.3.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	42
5.3.4	<i>Proyectos Implementados</i>	45
5.4	ELECTRO-OBTENCIÓN. <i>LÍNEA HIDROMETALÚRGICA</i>	46
5.4.1	<i>Descripción</i>	46
5.4.2	<i>Caracterización Energética</i>	47
5.4.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	49
5.4.4	<i>Proyectos Implementados</i>	60
6	BIBLIOGRAFÍA	62

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.

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.

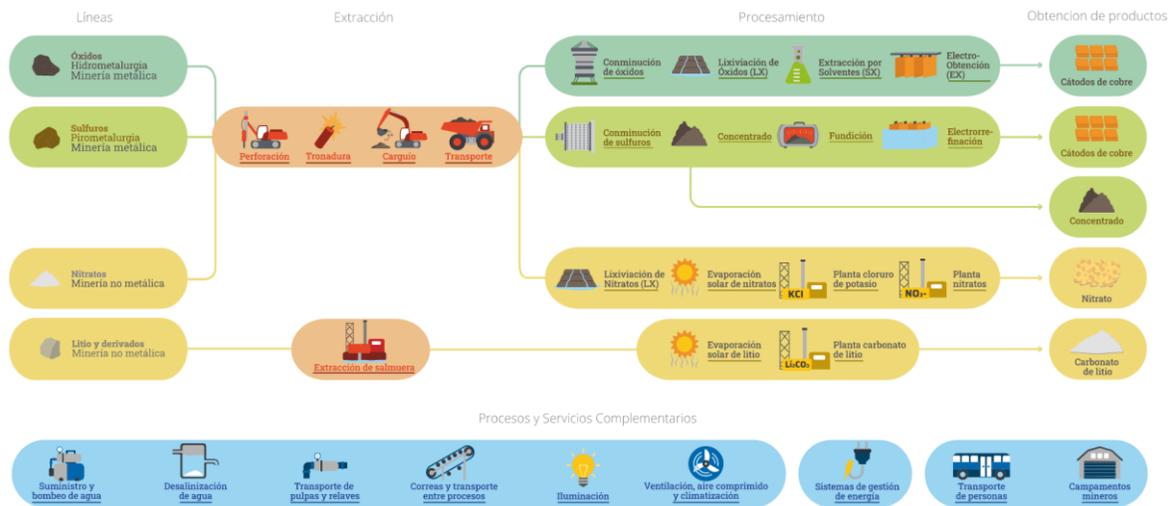


Ilustración 1. Mapa de procesos mineros. Fuente: GIZ.

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 CO₂. 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 tCO₂ 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.

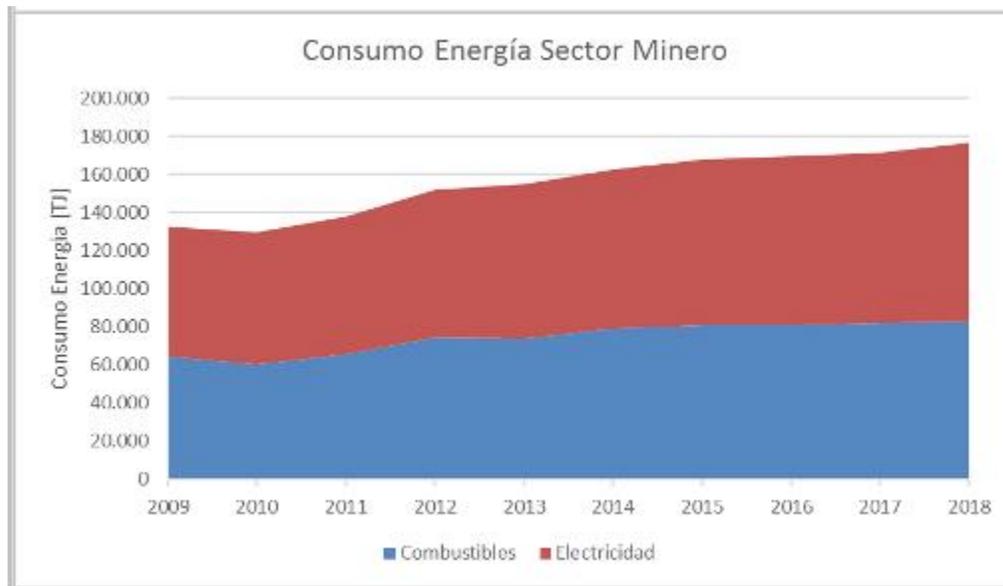


Ilustración 2. Consumo de energía en sector minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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.

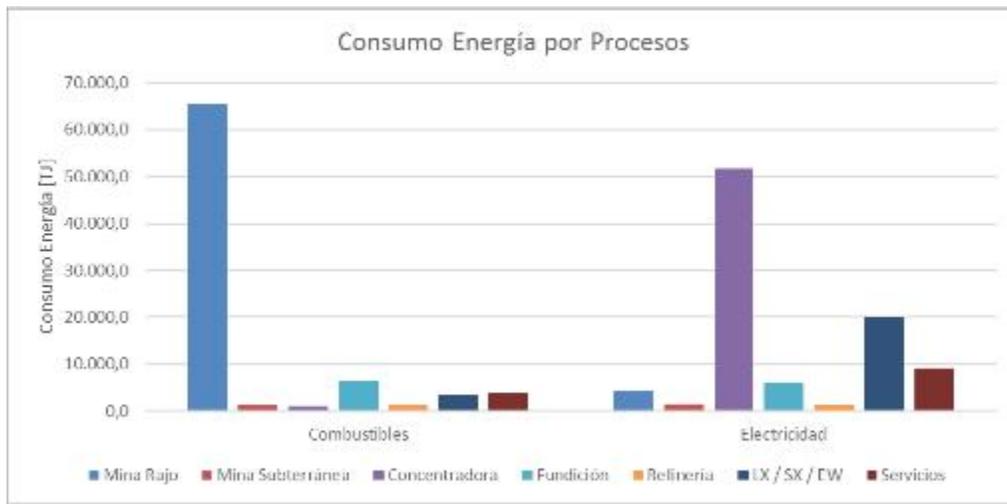


Ilustración 3. Consumo de energía por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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

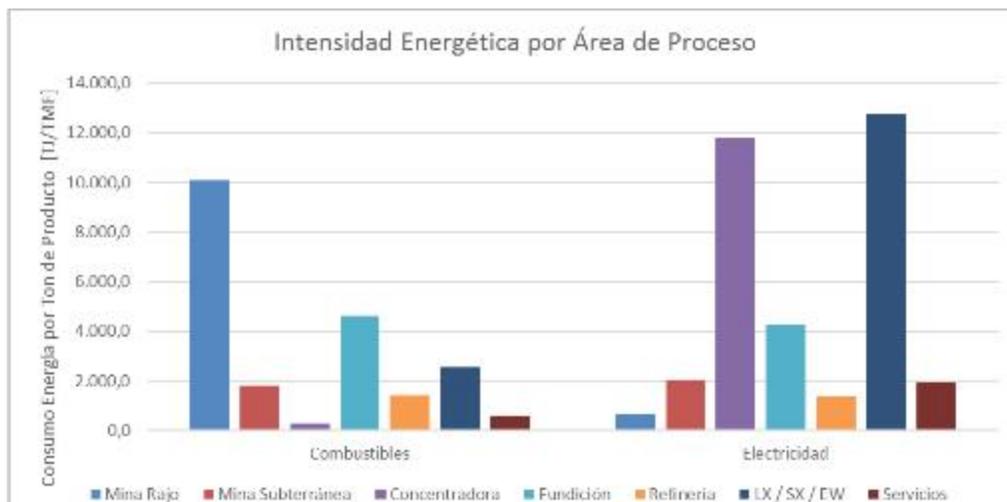


Ilustración 4. Consumo de energía en por tipo de combustibles y procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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.

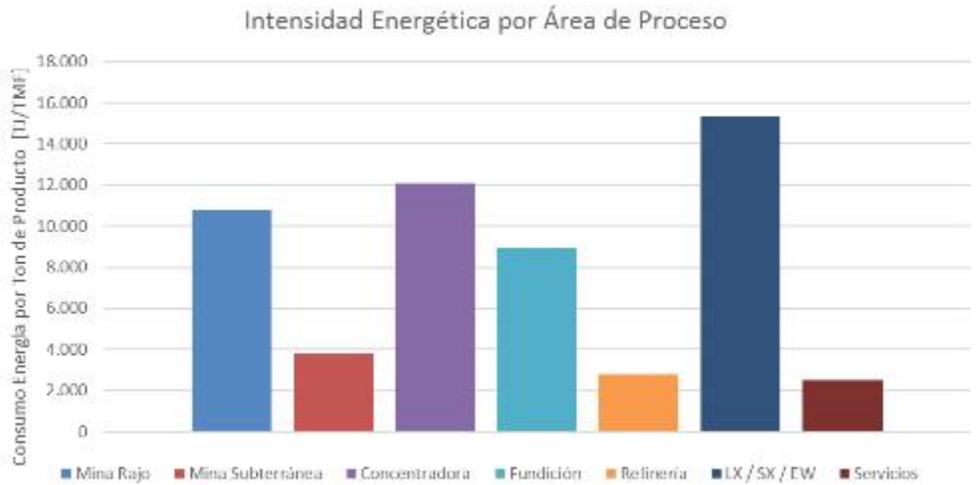


Ilustración 5. Intensidad energética por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

5 Procesos mineros

5.1 Conminución. Línea Hidrometalúrgica

La acción de reducir el tamaño de los minerales permitiendo liberar las especies valiosas contenidas en ellos es lo que se conoce como conminución.

En hidrometalurgia, la conminución tiene principalmente dos subetapas, que corresponden al chancado y la clasificación en seco, tal como lo indica el siguiente diagrama.



5.1.1 Chancado

5.1.1.1 Descripción

El proceso de chancado corresponde a un proceso de conminución realizado en seco, cuyo fin es reducir el tamaño de los fragmentos de rocas provenientes de la mina cuya granulometría es variada. Para este proceso se emplean chancadores, que corresponden a equipos mecánico-eléctricos que a través de movimientos de atrición¹ trituran la roca. El correcto funcionamiento de dichos equipos se relaciona directamente con el tamaño final de las partículas, existiendo un punto óptimo en el cual tales equipos maximizan su eficiencia. Esto, implica que una vez que se ha superado ese punto, el trabajo realizado es menor respecto a la energía consumida.

Por lo general, el proceso de chancado se realiza en etapas, iniciando con el chancado primario, y pasando por el secundario y terciario. Incluso, en algunos casos, se considera un chancado cuaternario.

La selección de los equipos y sus respectivos tamaños dependerá fundamentalmente de las características físicas y geológicas del material tronado (volumen y tonelaje, tamaños de alimentación y salida, dureza, tenacidad, abrasividad, humedad de la roca, entre otros), y de las necesidades granulométricas de la siguiente operación productiva [1].

Es de importancia seleccionar y operar adecuadamente un chancador ya que dicho proceso se caracteriza por requerir un elevado consumo energético, lo cual puede generar un alto impacto económico en la cadena productiva.

¹ Abrasión de partículas entre sí por medio de la agitación. Fuente: (Jack de la Vergne, 2012)



Ilustración 6. Chancador primario giratorio. Fuente: [2].

5.1.1.2 Caracterización Energética

Los procesos de conminución corresponden a uno de los procesos con mayor consumo de energía eléctrica, representando en algunos casos cerca del 70% del gasto energético de una planta minera de una planta minera, magnitud que puede verse incrementada cuando se pretende llegar a tamaños de partículas más finos. La siguiente tabla muestra los consumos de energía esperados por tonelada de alimentación según sub etapa de chancado [3].

Tabla 1. Consumo de energía por sub etapas de chancado. Fuente: [3].

Etapa	Sub-etapa	Rango de Tamaño (referencial)	Consumo de energía [kWh/t]
Chancado	Primario	100 a 10 cm	0,3 a 0,4
	Secundario	10 a 1 cm	0,3 a 2
	Terciario	1 a 0,5 cm	0,4 a 3

Los consumos de energía asociados a este proceso tienen relación con los motores de grandes dimensiones que forman parte de los diferentes tipos de chancadores, motores cuya potencia pueden ir desde los 180 kW a los 1.200 kW [4].

En la siguiente ilustración, se presenta el consumo energético del asociado a la etapa global de Concentración, la cual considera los procesos de chancado y molienda, entre otros. En esta es posible apreciar la elevada intensidad energética asociada a la etapa de Concentración respecto a los demás procesos, atribuyéndose casi completamente dicho consumo a la energía eléctrica.

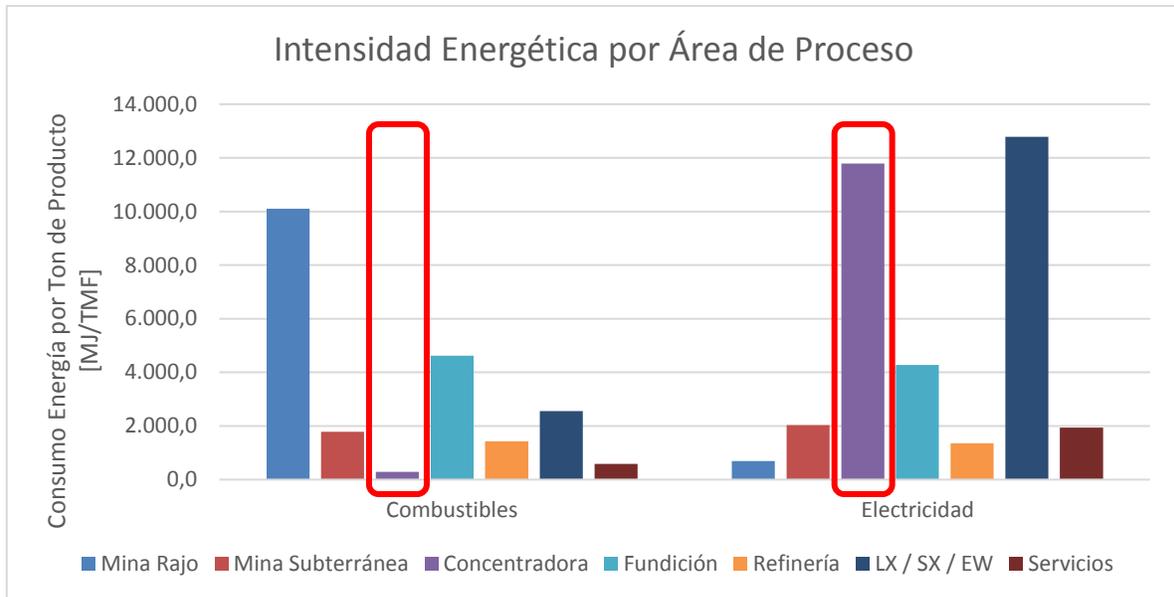


Ilustración 7. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso asociado a la Concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado. Fuente: en base a [5].

En cuanto a la tipología de chancadores, estos se pueden resumir en los siguientes [3], [6]:

1. Chancadores de compresión:
 - a. De mandíbula (razón de reducción 3-5)
 - b. Giratorio (razón de reducción 4-7)
 - c. De cono (razón de reducción 3-5)
 - d. De rodillo
2. Chancadores de impacto de eje horizontal (razón de reducción 10-25)
3. Chancadores de impacto eje vertical (razón de reducción 6-8)
4. De rodillo de alta presión – High Pressure Grinding Rolls (HPGR) (razón de reducción 2-5)



		
Chancadores de rodillos	De impacto de eje horizontal	De impacto de eje vertical
		
Chancadores HPGR		

5.1.2 Separación en Seco

5.1.2.1 Descripción

Como parte de la etapa de conminución es usual encontrarse con el uso de harneros, con los cuales es posible controlar el tamaño de los fragmentos mediante la separación del mineral de alimentación en fracciones homogéneas de tamaño. De este modo, el material fino puede pasar a la siguiente etapa, mientras los tamaños más gruesos pueden volver a ser chancados [7].

A modo general, un harnero consiste en una superficie con una multiplicidad de aberturas de una cierta dimensión, y la cual retiene selectivamente las partículas cuyo tamaño es mayor al de dichas aberturas, dejando pasar únicamente a las partículas de menor tamaño.

Las variables que se deben tener en cuenta para un funcionamiento eficiente de un harnero son las siguientes:

1. Velocidad de alimentación
2. Tipo de movimiento del harnero y pendiente
3. Humedad del material
4. Tipo de superficie de harneado, área y forma de aberturas
5. Porcentaje del área abierta
6. Tipo de material a tratar (analizar dureza, forma de partículas, peso específico)

La importancia de este proceso radica en el aumento de capacidad del equipo chancador, en evitar dificultades que provocan los finos (atascos), y en la reducción del consumo de energía [1].



Ilustración 8. Harnero vibratorio en funcionamiento. Fuente: [8].

5.1.2.2 Caracterización Energética

En minería, la tecnología usualmente empleada en el proceso de separación en seco corresponde a la tecnología de harneros vibratorios, los que se caracterizan por tener un sistema de accionamiento cuyo propósito consiste en estratificar el material que llega a la malla y transportar el material sobre la superficie de ésta hacia el punto de descarga.

En general, el movimiento de los harneros vibratorios se produce mediante un mecanismo basado en contrapesos o ejes excéntricos accionados por un motor eléctrico, ya sea con acople directo o con un sistema de transmisión de potencia [9]. La mayoría de los generadores de movimiento permiten ajustar la amplitud y frecuencia del harnero con el propósito de trabajar bajo los parámetros operacionales requeridos.

En cuanto a la potencia eléctrica con las cuales operan estos equipos, estas pueden ir desde los 10 kW, y superar los 60 kW [10].

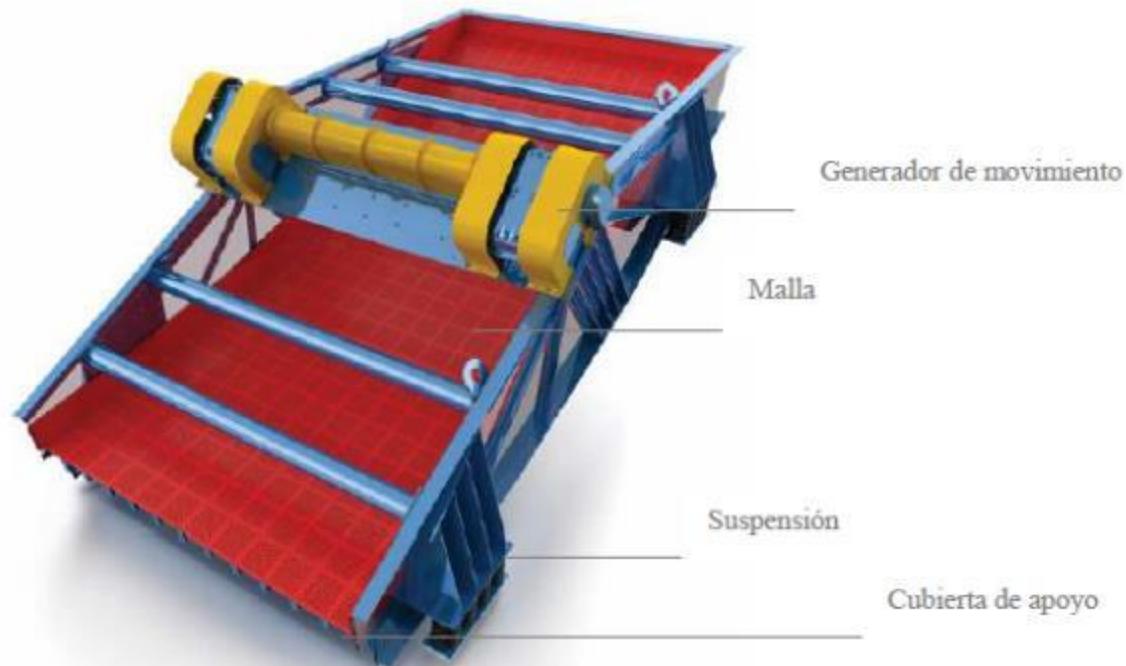


Ilustración 9. Harnero vibratorio tipo banana. Fuente: [11]



Ilustración 10. Harnero vibratorio horizontal. Fuente: [12].

5.1.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.1.3.1 Selección de chancador y número de etapas. M5.1

Medida de diseño

Medida eléctrica

El índice de trabajo, o índice de Bond, es un parámetro de conminución que se define como la resistencia de un material a ser triturado o molido. Dicho parámetro es de gran relevancia en el diseño de un sistema de chancado ya que permite definir qué tipo de máquina se debe utilizar para llevar a cabo el trabajo requerido, así como también permite definir el número óptimo de etapas de chancado. En efecto, un material de bajo índice de Bond implica que es un material fácil de fragmentar,

por lo que se requerirá posiblemente un chancador con capacidad intermedia y/o un número de etapas reducido. Por el contrario, si un material tiene un índice de trabajo alto, implica que, para obtener el tamaño de roca requerido es necesario un equipo de mayor capacidad y/o un mayor número de etapas.

Existen varios tipos de chancadores, cuya tipología se clasifica en función del tamaño del material de alimentación y de salida. Asimismo, cada uno de estos equipos tiene un campo específico de aplicación, por lo que se recomienda utilizarlo de forma conveniente en los casos en que existan condiciones para ello, ya que, si bien un chancador puede fragmentar todo tipo de roca, dicha fragmentación debe efectuarse de manera eficiente. Para que las operaciones de reducción de tamaño de roca se efectúen de manera correcta, es necesario estudiar y determinar las características de alimentación de los minerales que ingresarán al circuito. El parámetro más importante en este proceso de caracterización corresponde al índice de Bond asociado al mineral. Los valores de algunos materiales de alimentación típicos de circuitos de chancado se muestran a continuación.

Tabla 2. Índice de Bond para ciertos minerales. Fuente: [7]

Sólidos	Wi [kWh/ton corta]	Sólidos	Wi [kWh/ton corta]
Andesita	18,25	Gneis	20,13
Aceite de esquisto	15,84	Hernatita	12,84
Arcilla	6,30	Magnesita	11,13
Arena de Sílice	14,10	Magnetita	9,97
Barinita	4,73	Materia prima de cemento	10,51
Basalto	17,10	Mineral de cobre	12,72
Bauxita	8,78	Mineral de estaño	10,90
Caliza	12,74	Mineral de manganeso	12,20
Carbón de piedra	13,00	Mineral de Níquel	13,65
Carburo de Sílice	25,87	Mineral de oro	14,93
Coque	15,13	Mineral de pirita	8,93
Cuarcita	9,58	Mineral de plomo	11,90
Cuarzo	13,57	Mineral de plomo-zinc	10,93
Diorita	20,90	Mineral de potasa	8,05
Dolomita	11,27	Mineral de pyrrhotita	9,57
Escoria	10,24	Mineral de rutilo	12,68
Escoria de Cemento	13,45	Mineral de spodumeno	10,37
Esmeril	56,70	Mineral de titanio	12,33
Esquisito	15,87	Mineral de zinc	11,56
Feldespató	10,80	Molibdeno	12,80
Ferro-cromo	7,64	Pedernal	26,16

Sólidos	Wi [kWh/ton corta]	Sólidos	Wi [kWh/ton corta]
Ferro-manganeso	8,30	Pizarra	14,30
Ferro-silicona	10,01	Rocka de fosfato	9,92
Fluoro natural	8,91	Rocka de trapeana	19,32
Gabro	18,45	Roca de yeso	16,06
Grafito	15,13	Sienita	13,13
Granito	20,13	Silicato de sílice	13,40
Gravilla	43,56	Taconita	14,61
		Vidrio	12,31

Otro parámetro de relevancia a considerar en la selección de un chancador debe ser la relación entre el tamaño de alimentación y de descarga, el cual se conoce como razón de reducción. Todos los chancadores poseen una razón de reducción limitada, lo que implica que se requerirá necesariamente un conjunto de etapas que permita obtener el tamaño de roca deseado. El número de etapas estará definido en efecto por el tamaño de la alimentación y el producto final requerido: por ejemplo, para un material de tamaño de alimentación de $F_{80} = 400$ mm (tamaño 80% menos que 400 mm) que requiere reducir su tamaño a $P_{80} = 16$ mm, la razón de reducción total será:

$$R = F_{80}/P_{80} = 400/16 = 25.$$

Por otra parte, la razón de reducción que se obtiene al trabajar con N etapas será $R_1 \times R_2 \dots \times R_N$, donde R_i corresponde a la razón de reducción de un chancador en particular. Ahora, siguiendo con el ejemplo, en el caso de contar con chancadores cuya razón de reducción es 3, el número de etapas necesarias para obtener una razón de reducción próxima a 25 debe ser 3, número con el cual se obtiene una razón de reducción igual a 27. Una vez definido el número de etapas de chancado y realizada la caracterización del material de alimentación, se puede comenzar a seleccionar el chancador para cada etapa de reducción de tamaño.

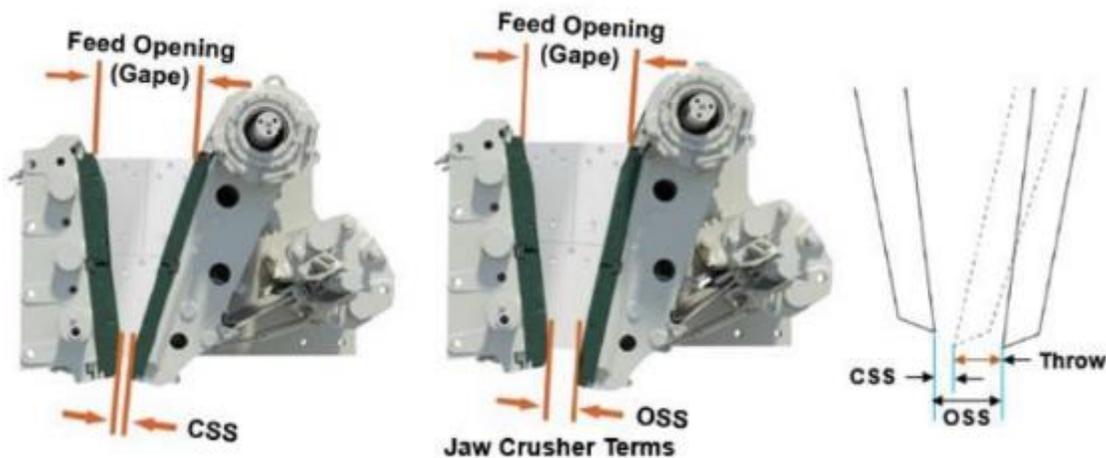
Por lo general, para el chancado primario a nivel estacionario, ya sea en superficie o subterráneo, se tienen como opciones los chancadores giratorios primarios, de mandíbula y de impacto. Para minerales blandos, la primera opción es frecuentemente un chancador de impacto horizontal, si es que la capacidad requerida no es muy alta. Para un mineral duro, las opciones de elección están entre un chancador giratorio o uno de mandíbula. Para el chancado secundario, en el cual se toma en cuenta en mayor medida el control del tamaño, por lo general se implementa el chancador de cono estándar. Este, cuenta con ciertas ventajas que lo hacen adecuado para la reducción de tamaño y forma de su producto final. Para un chancado terciario, por otro lado, se requiere de mayor certeza en su diseño ya que el tamaño final del producto es fundamental en el éxito del procesamiento posterior. Para circuitos de chancado con roca mineralizada dura, las opciones por lo general son chancadores de cono o chancadores de impacto de eje vertical [7].

5.1.3.2 Chancadores de mandíbula: recomendaciones generales de operación. M5.2

Medida operacional

Medida eléctrica

Los chancadores de mandíbula son máquinas de gran capacidad que suelen emplearse dentro del chancado primario. Su mecanismo de funcionamiento se basa en emplear fuerzas de compresión para triturar el material de alimentación, lo cual se logra mediante dos estructuras reconocidas como mandíbulas que ejercen presión sobre este último. Concretamente, una de las mandíbulas se mantiene fija (reconocida como mandíbula fija/estacionaria), mientras que la otra (mandíbula oscilante/móvil), se mueve hacia adelante y hacia atrás respecto a la primera. Cuando la mandíbula oscilante se desplaza hacia la mandíbula fija, se ejerce presión sobre el material, el cual se tritura y reduce su tamaño. A continuación, se muestra un esquema de un chancador de mandíbula, donde se resaltan los términos de abertura de alimentación (Feed Opening) y la abertura máxima (Open Side Setting OSS) y mínima de descarga (Closed Side Setting CSS), los que corresponden a unos de los principales parámetros de diseño de un chancador de mandíbula.



La abertura de alimentación es la distancia entre las mandíbulas en la zona superior del conjunto. La abertura máxima de alimentación se mide desde la parte superior del diente de la mandíbula fija hasta la parte inferior del diente de la mandíbula móvil en una línea recta perpendicular a la línea central de la cavidad de trituración. En efecto, la abertura de alimentación define el tamaño máximo de alimentación de la trituradora, el cual es aproximadamente el 80% de la primera. La abertura máxima de descarga (OSS), tal como lo indica su nombre, corresponde a la distancia máxima entre las mandíbulas en la zona inferior. En cuanto a la abertura mínima de descarga (CSS), este corresponde al parámetro más importante de la trituradora, ya que define el tamaño máximo del producto y tiene una influencia significativa en la capacidad, la gradación del producto, el consumo de energía y el desgaste.

Teniendo en cuenta estos términos, se recomienda en primer lugar que los finos (material más pequeño que el CSS) sean removidos del material de alimentación. Esto, mediante la instalación de un alimentador grizzly. Esto, reduce el desgaste de los revestimientos de la mandíbula y puede mejorar el rendimiento general de la planta. Por otra parte, es recomendable verificar que el tamaño del material de alimentación no sea elevado, ya que esto disminuye la capacidad de la chancadora y puede causar tensiones innecesarias en los componentes de ésta. Asimismo, se recomienda no operar la chancadora con un CSS más pequeño que el indicado en el manual de operación y mantenimiento, ya que esto conducirá a un mayor desgaste de las placas de mandíbula. Se recomienda

evaluar el perfil de desgaste de las placas de mandíbula, debido a que un perfil de desgaste desigual disminuirá la capacidad, aumentará el desgaste y aumentará las fuerzas de trituración y por tanto el consumo energético asociado al proceso. En el caso de que las placas de control y las placas de mandíbula se desgasten por completo, deben cambiarse con el fin de evitar que se dañen los componentes de la trituradora. En efecto, se recomienda que una chancadora de mandíbula no siga funcionando una vez que el perfil de los dientes de la placa de mandíbula se haya reducido por debajo del 90% de su altura de perfil nominal [13].

5.1.3.3 Chancadores de cono: recomendaciones generales de operación. M5.3

Medida operacional

Medida eléctrica

Las chancadoras de cono son trituradoras a compresión que se utilizan en las etapas secundaria, terciaria y cuaternaria. Estas chancadoras trituran el material apretando entre un eje principal giratorio excéntrico que está cubierto por un manto resistente al desgaste, y la tolva cóncava, la cual se encuentra cubierta por un revestimiento (cóncavo). A medida que el material ingresa en la parte superior de la chancadora, se encaja y se aprieta entre el manto y el revestimiento. Los fragmentos de mayor tamaño se rompen y luego caen a una posición más baja donde se rompen nuevamente. Este proceso continúa hasta que los pedazos son lo suficientemente pequeños como para caer a través de la estrecha abertura en la parte inferior de la trituradora.

El sistema de liberación hidráulica de una chancadora de cono actúa como una protección contra sobrecargas que permiten que el mineral triturado pase a través de la cámara de trituración sin dañar la trituradora. Para la automatización, muchos fabricantes proporcionan características modernas como el mecanismo hidráulico para el ajuste de la configuración. Estos sistemas de automatización ajustan constantemente el CSS (Closed Side Setting) sin necesidad de apagar la máquina. Compensan las variaciones en el material de alimentación y el desgaste de las piezas de desgaste.

Las piezas de desgaste, el manto y el revestimiento de la cuba están hechos frecuentemente de acero y manganeso. El rendimiento de las piezas de desgaste depende de la disposición de la alimentación, la velocidad, el ajuste del lado cerrado (CSS) de la trituradora, entre otros. La alimentación irregular provoca un desgaste no uniforme del revestimiento; por el contrario, la alimentación por estrangulamiento es el método más apropiado para el desgaste uniforme de este último. La condición en la que la velocidad de alimentación excede la velocidad del producto se conoce como alimentación por estrangulamiento.

A modo de recomendación, se sugiere tener en consideración los siguientes factores que disminuyen la capacidad y rendimiento de la chancadora de cono [13]:

1. Material pegajoso en la alimentación de la chancadora.
2. Humedad excesiva en el material de alimentación.
3. Finos en la alimentación (fragmentos de menor tamaño que la configuración de la chancadora) que excedan el 10% de la capacidad de la chancadora.
4. Distribución inadecuada de la alimentación alrededor de la circunferencia de la cavidad de la chancadora.
5. Funcionamiento de la chancadora a una velocidad de operación inferior a la recomendada en las condiciones de carga completa.



Fuente: Revista Minería Chilena

5.1.3.4 Recomendaciones generales de lubricación de chancadores. M5.4

Medida operacional

Medida eléctrica

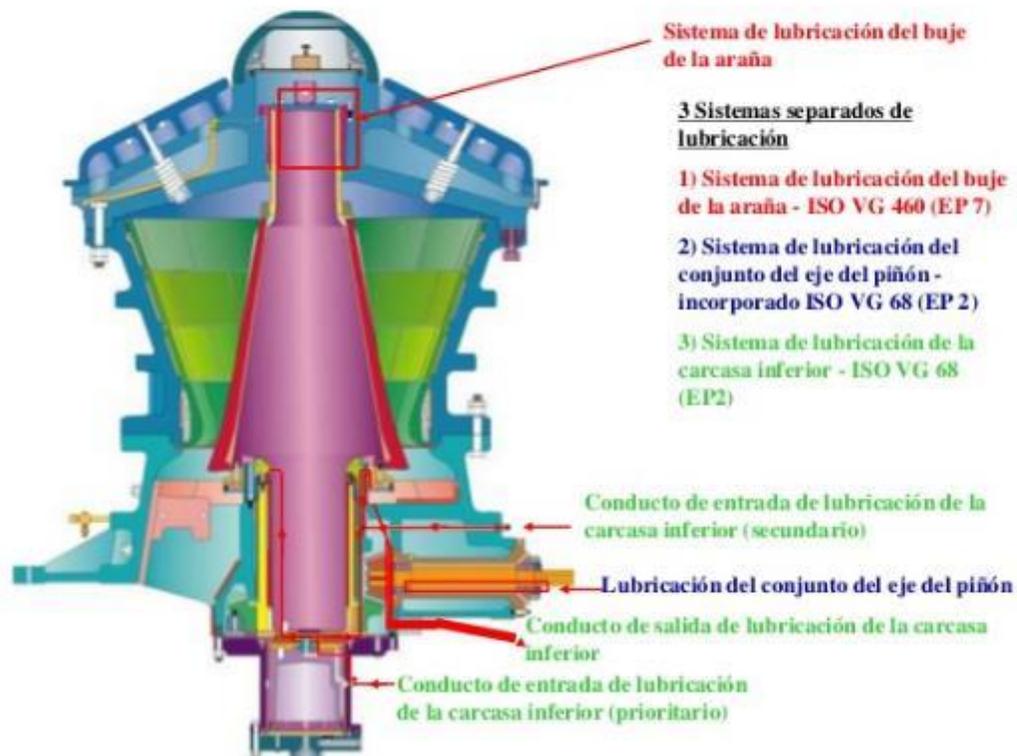
La lubricación de las partes y componentes móviles de una chancadora es muy importante para un funcionamiento sin problemas y para una larga vida útil. En general, los componentes de la chancadora se lubrican con grasa o con aceite. Para el caso de la lubricación con grasa, existen sistemas de engrase centralizados motorizados o manuales. Para las máquinas pequeñas, la lubricación suele ser realizada manualmente, en cuyo caso los puntos de lubricación están equipados con engrasadores y deben ser engrasados con una pistola destinada a la inyección de grasa. Antes de aplicar esta última, se deben limpiar los engrasadores y la boquilla de la pistola de engrase. Se recomienda, por otra parte, que la grasa de los cojinetes se cambie periódicamente (por ejemplo, cada dos años de funcionamiento). Antes de sustituir la grasa, se sugiere limpiar a fondo los cojinetes y la caja que los contiene. Las cajas de los rodamientos no deben llenarse completamente con grasa, ya que un exceso de ella hará que la temperatura de funcionamiento aumente rápidamente, sobre todo cuando se trabaja a altas velocidades. Por regla general, sólo el rodamiento debe llenarse completamente, mientras que el espacio libre del alojamiento debe llenarse parcialmente (entre el 30 y el 50%) con grasa. Los rodamientos pueden descargar algún exceso de grasa a través de los laberintos después de un corto periodo de funcionamiento. Se sugiere no sustituir esta descarga inicial de grasa a menos que esta continúe y la pérdida sea excesiva, ya que en efecto esto último puede provocar un aumento repentino de la temperatura.



Con relación a la lubricación con aceite, esta suele emplearse para aplicaciones de carga elevada. Generalmente el método de circulación forzada de aceite se utiliza para la lubricación de las partes móviles de una chancadora. También funciona como un producto en el que se transporta los contaminantes al filtro para su eliminación. Operar una chancadora lubricada con aceite contaminado (aceite viejo y sucio) es un error común. Cuando se descuida el mantenimiento del sistema de lubricación, el polvo puede infiltrarse en la unidad de lubricación y contaminar el aceite. A medida que el aceite contaminado fluye sobre las superficies de los rodamientos dentro de la chancadora, este puede actuar como un compuesto que genera roce y que por tanto desgasta la superficie de los componentes. Este desgaste, es lo que genera la necesidad de sustituir prematuramente los componentes. Por esta razón, se recomienda realizar revisiones, inspecciones y mantenimiento del sistema de lubricación.

En primera instancia, se sugiere monitorizar la temperatura del aceite lubricante, en particular, la temperatura del aceite de la línea de drenaje normal de una chancadora y el diferencial de temperatura normal entre el suministro y el drenaje. Una condición anormal requiere de un análisis más detallado. Asimismo, se recomienda monitorizar la presión del aceite lubricante. Algunas de las causas que podría asociarse a una presión de aceite más baja de lo normal pueden ser: una baja tasa de flujo de aceite causada por una bomba de aceite desgastada, una válvula de alivio principal defectuosa, o tener excesivas holguras en los cojinetes dentro de la chancadora causadas por el desgaste de los casquillos. Al monitorear la presión del aceite lubricante, se puede programar y tomar medidas correctivas según la condición anormal que haya. Por otra parte, se sugiere llevar a cabo un programa de análisis del estado del aceite durante su vida útil. Las cinco pruebas principales que se realizan en el análisis incluyen la viscosidad, la oxidación, el contenido de agua, el recuento de partículas y el desgaste de la máquina. Un informe de análisis de aceite que muestra una condición anormal da la oportunidad de investigar y corregir el problema antes de la falla.

Sistema de lubricación



Fuente: <https://www.slideshare.net/oscaravariaalvarez5/trabajo-de-lubricacion-chancado>

5.1.3.5 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% [14].

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

5.1.3.6 Implementación de partidador suave en chancadores. M5.5

Medida operacional

Medida eléctrica

Los arranques bruscos en los motores eléctricos de maquinaria industrial traen consigo diferentes consecuencias negativas, siendo las principales las que se indican a continuación:

1. Problemas eléctricos causados por altas tensiones y corrientes transitorias que pueden sobrecargar la red de alimentación local y producir variaciones inaceptables de tensión, con interferencias en otros equipos eléctricos conectados a la misma red.
2. Aumento del consumo energético de forma innecesaria debido a las altas tensiones y corrientes transitorias producidas.
3. Problemas mecánicos que someten a grandes esfuerzos a toda la cadena de accionamiento, desde el motor hasta el equipo de trabajo.

Para solucionar esto, existen los partidores suaves, que corresponden a dispositivos electrónicos basados en tiristores. Con estos dispositivos, se puede controlar la tensión del motor de forma que ésta aumente gradualmente durante la puesta en marcha, lo cual limita la intensidad corriente de arranque. Esto implica que el motor se pone en funcionamiento de forma gradual, y que los

esfuerzos mecánicos y eléctricos se reducen al mínimo. Asimismo, estos dispositivos también permiten obtener una parada suave.

Dado que los circuitos del partidor son electrónicos, es relativamente sencillo complementar su función básica con diversas indicaciones de seguridad y fallo, con el fin de mejorar la protección del motor y facilitar la localización de averías. Ejemplo de aquello son la protección contra las fallas de fase, sobreintensidades y sobrecalentamiento, así como dar indicaciones de funcionamiento normal, tensión máxima del motor y de determinadas fallas (Electro Industria, 2003).

La implementación de un partidor suave en chancadores que forman parte de la etapa de conminución trae consigo la disminución de la tensión aplicada en el motor mientras que éste se encuentra con un factor de potencia bajo. Así, con la tensión reducida en el motor se disminuye básicamente la pérdida de vacío. En términos cuantitativos, este sistema puede producir ahorros de hasta un 30% (KGHM Chile, 2019).

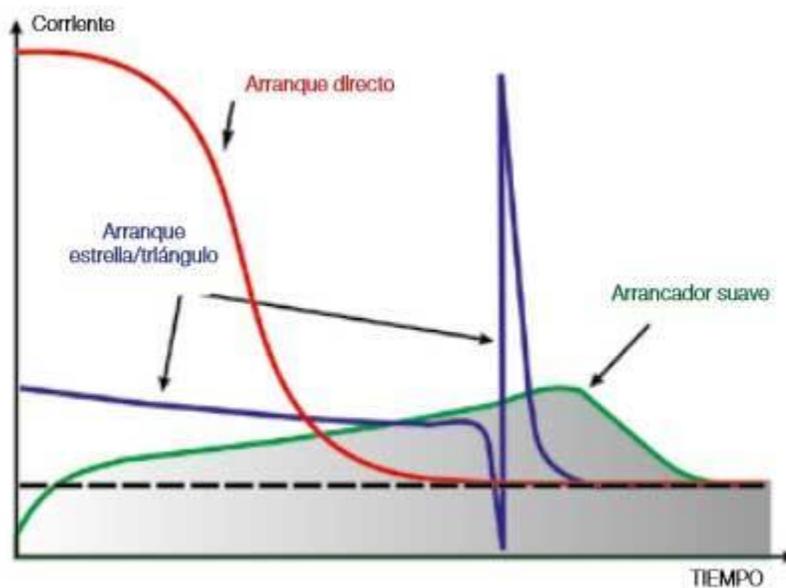


Figura: Gráfico Corriente vs tiempo según tipos de arranque

5.1.3.7 Recambio del revestimiento en chancadores. 5.6

Medida operacional

Medida eléctrica

El desgaste de los equipos y componentes en los circuitos de chancado es extenso debido a la naturaleza física del proceso de trituración y a la abrasividad del material de las rocas. Estos factores, tienen diferentes efectos dependiendo de la unidad de producción y del material de la roca. El desgaste en las trituradoras de compresión, como las trituradoras giratorias y de cono, se suele clasificar como abrasivo, el cual provoca cambios en los perfiles de los revestimientos, reduciendo el rendimiento de la chancadora y por tanto aumentando el consumo energético de la misma. El nivel de desgaste en una trituradora de cono, por otra parte, depende de una serie de factores como las propiedades del material, la distribución del tamaño de las partículas y la humedad, factores que en su conjunto desgastan los perfiles de los revestimientos e inciden negativamente en el rendimiento operacional del chancado (Asbjörnsson, 2015).

El desgaste continuo del revestimiento de los chancadores trae consigo efectos que perjudican el rendimiento del proceso de chancado. Por esta razón, se recomienda realizar un recambio del revestimiento, el que corresponde a un elemento de recambio. La función del revestimiento es proteger las partes del chancador expuestas a desgaste debido al impacto y roce del mineral. Los revestimientos son piezas de desgaste fundidas y están fabricadas en acero resistente a la abrasión y los golpes. Por lo general, entre el revestimiento y la pieza protegida se coloca material de respaldo epóxico, con el propósito de lograr un buen apoyo, amortiguar vibraciones y soportar pequeñas deformaciones que pueda sufrir el revestimiento por causa de los impactos (Zavala, 2018).



Figura: Revestimiento de Chancadores. Fuente: Aceros Chile

5.1.3.8 Control de tamaño de partículas de alimentación en chancadores. M5.7

Medida operacional

Medida eléctrica

El control de tamaño de partículas es el proceso mediante el cual se separan los sólidos en dos o más productos en base a su tamaño. La clasificación por tamaño es un paso esencial en el procesamiento de minerales, ya que permite aumentar la eficiencia de procesos posteriores, como en este caso es el proceso de chancado.

El control del tamaño de partículas previo al ingreso de chancadores cumple con el propósito de:

1. Permitir que los finos pasen por alto el circuito de chancado y retener las partículas de tamaño superior para que reduzcan su tamaño en dicho circuito.
2. Proporcionar un material de tamaño de partícula óptimo para un procesamiento eficiente en los sistemas de chancado y procesos posteriores.

3. Preparar un producto que cumpla con las especificaciones de tamaño de las partículas requeridas.

Los equipos empleados para este propósito corresponden a harneros o tamizadores. Estos se conforman por un medio de cribado que causa la separación de las partículas, lo cual se lleva a cabo mediante el movimiento ondulatorio de la maquinaria (Balasubramanian A. , 2017).



Figura: Alimentación de Chancadores. Fuente: Revista Minería Chilena

5.1.3.9 Verificación de eficiencia en subetapas de chancado. M5.8

Medida operacional

Medida eléctrica

Se recomienda la verificación sistemática del consumo de energía de la planta de chancado en función de las toneladas procesadas de material y que este consumo de energía se analice por cada sub-etapa de chancado.

Para ello es primordial contar con medidores de energía por subetapa de chancado o idealmente por cada chancador de modo de poder cuantificar el consumo por cada tonelada procesada en cada unidad. Se deberá verificar que el consumo específico esté dentro o sea inferior del rango de la tabla siguiente.

Tabla 4. Consumo de energía por subetapas de chancado (Fuente: Navarro, P)

Etapa	Sub-etapa	Rango de Tamaño (referencial)	Consumo de energía [kWh/t]
Chancado	Primario	100 a 10 cm	0,3 a 0,4
	Secundario	10 a 1 cm	0,3 a 2
	Terciario	1 a 0,5 cm	0,4 a 3

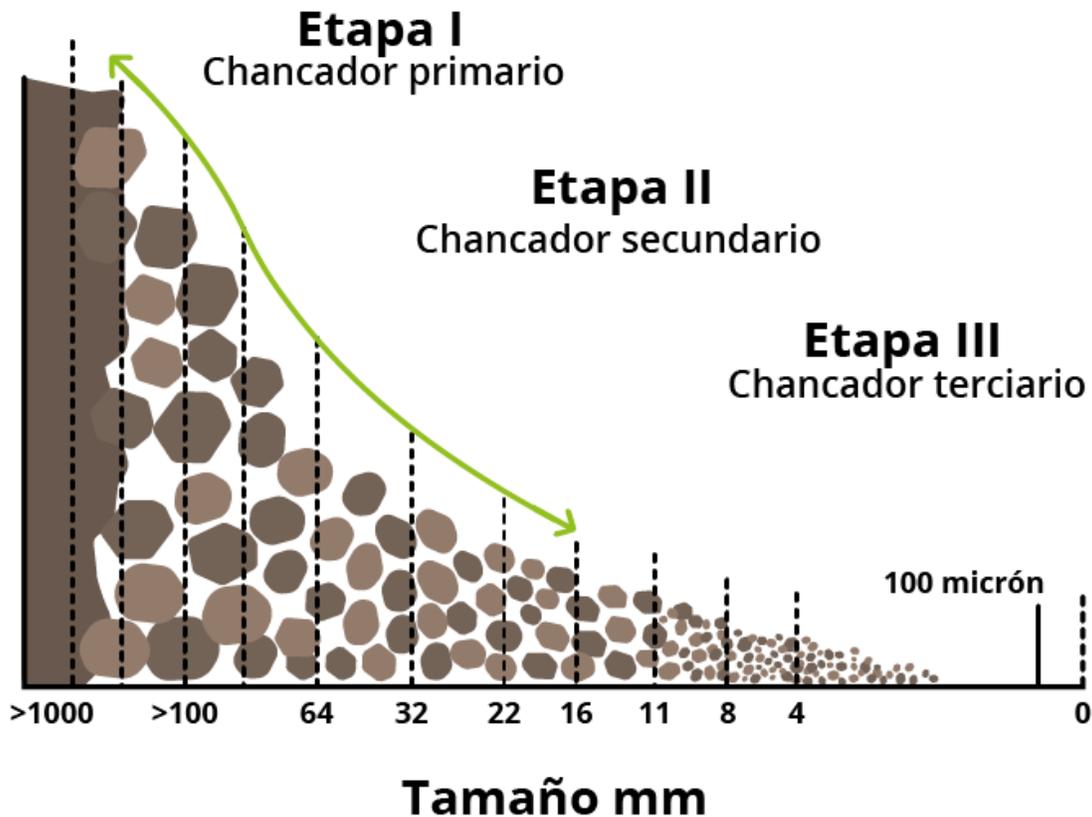


Figura: Tamaño de mineral por etapa de chancado

En caso de observarse consumos de energía superiores a los indicados en la tabla se deberá realizar una adecuada mantención de las unidades de chancado verificando el desgaste de las piezas, ya que cuando se excede el límite permisible de desgaste, la eficiencia de los chancadores se reduce considerablemente. Así también se deberá verificar el potencial sobredimensionamiento de los motores de las unidades que también trae consigo un aumento en el consumo de energía de este proceso.

5.1.3.10 Implementación de variadores de frecuencia en motor de harneros. M5.9

Medida operacional

Medida eléctrica

Los harneros son máquinas motorizadas que contienen mallas clasificadoras con múltiples aperturas de un tamaño determinado, que permiten llevar a cabo la clasificación requerida de los minerales. Dentro de su tipología, los harneros vibratorios son los más utilizados en la industria minera, pues

su movimiento permite un mejor avance del mineral, aumentando la estratificación (la estratificación es la distribución del mineral por tamaño a lo ancho de su cama) [15]. En la mayoría de los harneros el movimiento es generado por un sistema con contrapesos o ejes excéntricos accionados por un motor eléctrico, ya sea con acople directo o con un sistema de transmisión de potencia que utiliza correas en V [16].

Al ser máquinas que utilizan motores eléctricos para su funcionamiento, las cuales pueden trabajar a diferentes cargas de operación, se recomienda implementar variadores de frecuencia que permitan operar en función de la demanda exigida. Concretamente, un variador de frecuencia se utiliza para aplicaciones en las que el control de la velocidad de operación tiene una preponderancia esencial debido a constantes y/o repentinos cambios de carga, lo cual puede atribuirse al funcionamiento habitual de un harnero. Tales dispositivos electrónicos en efecto permiten variar la velocidad rotacional de un motor, actuando sobre la frecuencia de la corriente eléctrica. Los principales parámetros de accionamiento de un variador de frecuencia son [17]:

- Velocidad máxima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador de frecuencia a la cual se da la velocidad máxima, la que se mide en Hz y alcanza valores de 240 Hz, siendo lo usual 50 ó 60 Hz.
- Velocidad mínima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador a la cual se da la velocidad mínima, y la cual se entrega como un porcentaje de la velocidad máxima con valores que van desde -100% a 100%, siendo lo usual 0%.
- Tiempo de aceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia a pasar de 0 a la máxima velocidad. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Tiempo de desaceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia en pasar de la máxima velocidad, a cero. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Frecuencia base: frecuencia a la cual la máxima tensión es alcanzada, variando entre 25 a 250 Hz, siendo lo frecuente 50 ó 60 Hz.

Con relación a las ventajas de los variadores de frecuencia en comparación con otros sistemas de control, estas son [18]:

- Evita peaks de corrientes en los arranques del motor, los que pueden ser hasta cuatro veces la corriente nominal del motor en un arranque directo, en estrella-triángulo y otros medios con arrancadores progresivos.
- No tiene factor de potencia ($\cos(\varphi)=1$), lo que evita el uso de baterías de condensadores y el consumo de energía reactiva, a lo cual se asocia un ahorro energético.
- Los tiempos de aceleración y desaceleración son programables, por lo que los arranques y paradas son controladas.
- Protege completamente el motor, el variador y la línea.
- El consumo energético se adapta a la exigencia del motor, lo que provoca un ahorro energético.

Con relación a las características recomendadas para un buen variador de frecuencia, estas son [18]:

- Tamaño compacto que facilite su posterior instalación.
- Diseño que resiste un funcionamiento a la intemperie o en condiciones ambientales adversas, tal como ocurre en faenas mineras.

- Bajas emisiones de ruido, lo cual se logra mediante la tecnología IGBT, una frecuencia máxima de conmutación de hasta 16 KHz, y control PWM (Pulse-Width Modulation) sinusoidal, permitiendo obtener una mejor eficiencia energética.
- Regulación automática de voltaje.
- Facilidad de operación al usuario, idealmente por medio de teclado incorporado.
- Reinicio automático después de una interrupción de la alimentación.
- Diferentes niveles de velocidad seleccionables y ajustes independientes de tiempo de aceleración y desaceleración.
- Pantalla en la cual el usuario pueda ver los diferentes parámetros (frecuencia, velocidad, voltaje, corriente, entre otros).
- Entradas digitales programables para controlar el variador a través de un PLC.
- Entrada analógica para el control de la velocidad del motor.



Fuente: Metso

5.1.3.11 Recomendaciones generales de operación y mantenimiento de harneros. M5.10

Medida operacional

Medida eléctrica

Se recomienda evitar el cegamiento mediante una limpieza regular. El cegamiento se refiere a la tendencia de las partículas de tamaño similar a quedarse atascadas en el tamiz separador. El exceso de cegamiento afecta en gran medida la eficiencia de la máquina y por tanto requiere de una

limpieza periódica para corregirlo. Existen varios métodos para la autolimpieza de un harnero, entre ellos el uso de deslizadores, bandejas de bolas y tamices tipo sándwich.

Por otra parte, se recomienda reducir los problemas de estática. La electricidad estática acumulada puede hacer que el material se aglomere o se pegue a la criba de un harnero. En cualquier caso, la eficiencia del procesamiento se ve comprometida. Se puede corregir el cegamiento estático instalando un suelo en la máquina. Los problemas de aglomeración requieren de una intervención ambiental, ya sea ajustando la humedad de área de trabajo o utilizando un ionizador para reducir la carga estática.

Por último, se recomienda llevar a cabo un mantenimiento programado para mejorar la eficiencia de los harneros. En este sentido se recomienda consultar las especificaciones del fabricante para determinar la frecuencia con la que se debe realizar el servicio de mantenimiento, incluyendo el reemplazo de las juntas y las mallas, el ajuste de pernos, entre otros [19].



Fuente: Ingeniería y Construcciones Salas Hermanos Ltda.

5.1.4 Proyectos Implementados

<p>Verificación de eficiencia en subetapas de chancado</p> <p>Caso. Optimización rendimiento STMG.</p> <p>LOS PELAMBRES ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida:</p> <p>Nueva filosofía de operación que busca integrar las áreas de Mantenimiento, Chancador 1º y el nivel de stockpile de la Planta. Con esto, se busca mejorar la confiabilidad, el rendimiento y la continuidad de envío del Sistema de Transporte de Material Grueso (STMG).</p> <p>Ahorro:</p> <p>20.885 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 8.523 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>
---	--	--

<p>Verificación de eficiencia en sub-etapas de chancado</p> <p>Caso: Mejoramiento del factor de potencia. MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>El factor de potencia de la planta estaba en promedio cercano a 0,96. Se identifica que la planta de chancado es el mayor contribuyente en el bajo valor del factor de potencia, por lo que se decide instalar un banco de condensadores de 7,5MVAR en esta área. El ahorro de energía por disminución de pérdidas eléctricas tras la instalación del banco es de 0.22MWh, lo cual llevado a las horas de operación anual bajo las condiciones actuales (turn ON/OFF) equivale a 0.22MW*4032horas/año = 887.040 kWh/año</p> <p>A un costo promedio de la energía de US\$80 por MWh / año, proporciona un ahorro anual de US\$70.000 aproximadamente.</p> <p>Ahorro:</p> <p>887.040 kWh/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Freeport-El-Abra2019.pdf</p>
<p>Partidor suave para chancadores</p> <p>Caso: Partidor Suave para Chancador SIERRA GORDA KGHM</p>	<p>Potenciales mejoras al sistema de partida del motor del chancador primario de forma de aumentar la eficiencia energética en tal equipo. Se plantea disminuir la tensión aplicada por el partidor suave al motor del chancador mientras éste se encuentre con un factor de potencia muy bajo. Así, con la tensión reducida en el motor se disminuye básicamente la pérdida de vacío, y se minimiza la pérdida respectiva. Este sistema puede producir ahorros de hasta un 30%, con un promedio aproximado de 10% de la potencia y por ende, la energía activa usada para el funcionamiento del motor del chancador primario</p> <p>Ahorros:</p> <p>Chancador Terciario 240-CR005: 145.467,8 kWh/año</p> <p>Chancador Terciario 240-CR005: 120.866,6 kWh/año</p> <p>Chancador Secundario 230- CR-002: 59.509 kWh/año</p>	<p>Reporte Avance del Convenio de Cooperaciones entre Ministerio de Energía y Consejo Minero</p> <p>SCM FRANKE- SIERRA GORDA SCM</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-KHGM2019.pdf</p>
<p>Cambio de Corazas revestimiento chancadores de cono</p> <p>Cambio corazas médium a finas en revestimiento chancadores de cono Planta 20K y optimización del P80.</p> <p>TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>Medida:</p> <p>Existe un alto gasto de energía en los chancadores debido al espesor de las corazas.</p> <p>Se puede hacer lo mismo, pero con otro tipo de coraza. Se cambian las corazas, a una de espesor más delgado, pero con el mismo nivel de desgaste, sin afectar la confiabilidad del sistema.</p> <p>Ahorros</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción energía: 4,1 [TJ]/año ▪ Reducción emisiones gases: 471 [t CO2-e]/año 	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero</p> <p>TECK RESOURCES CHILE. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Teck2019.pdf</p>
<p>Chancador Sizer, disminuir las partículas para optimizar consumo específico</p>	<p>Medida:</p> <p>Existe una alta energía utilizada en el proceso de molienda debido a minerales más duros. Se instala un Chancador tipo Sizer en la línea de alimentación a molienda,</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero. TECK RESOURCES CHILE. 2020</p>

<p>del Molino SAG en 5%. TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>con el objetivo de reducir el tamaño o granulometría del mineral que entra a la molienda, utilizando menor energía en el proceso. Ahorro: Reducción energía: 8,9 [TJ]/año Reducción emisiones gases: 1.042 [t CO₂-e]/año</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Control de tamaño de partículas de alimentación de maquinaria de conminución Optimización de setting chancadores de cono, Planta 10K. TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>Medida: El setting o ajuste de tamaño de partícula de chancado, se encuentra fuera de rango, lo que hace que el tamaño de las partículas que van hacia la molienda sea muy grandes y con ello, existe un mayor gasto de energía. Se modifica el Setting en forma mecánica y a través de control a los valores de 7" tal como está concebido en el diseño. Ahorro: Reducción energía: 4,1 [TJ]/año Reducción emisiones gases: 471 [tCO₂-e]/año</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía Y Consejo Minero TECK RESOURCES CHILE. 2020 https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Verificación de eficiencia en subetapas de chancado Instalar variadores de frecuencia en harneros de Planta 20K TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>Medida: Reducir el consumo de energía eléctrica con la instalación de variadores de frecuencia. Se estima que se consumiría un 40% menos de energía eléctrica por harnero. Se instalan VDF en el sistema de correas, para controlar la velocidad y golpes de carga. Ahorro: Reducción energía: 0,9 [TJ]/año Reducción emisiones gases: 103 [tCO₂-2]/año</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía Y Consejo Minero TECK RESOURCES CHILE. 2020 https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Molienda eficiente mediante sistema de control Utilización Chancador 1°, 2° y 3° MINERA ANTUCOYA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida: Taller de análisis de las causas para las bajas en rendimiento, toma de decisión y monitoreo de impacto. Evaluar factibilidad técnica de disminución de tamaño de alimentación de mineral mediante el aumento del factor de carga en tronadura, la instalación de pica roca y parrillas en tolva de chancado primario. Aumento de la utilización del chancador primario mediante mejores prácticas de aseo operacional y mantenimiento. Evaluar rediseño de las barras de los harneros y del chute de salida del primario, estudiar la factibilidad de un switch de bloqueo operacional local e integrar la gestión de operación entre mina y área seca. Ahorro: 2.744 MWh/año Reducción emisiones: 1088 tCO₂e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero. Antofagasta Minerales. 2020 https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>

<p>Verificación de eficiencia en subetapas de chancado.</p> <p>Anglo american</p>	<p>Bulk Sorting</p> <p>En enero de 2019, Mina El Soldado de Angloamerican puso en marcha la planta Bulk Sorting, proyecto de innovación que permite hacer más eficiente el proceso minero, al detectar la composición del mineral y separarlo de acuerdo a la ley de cobre, con el fin de disminuir el ingreso de material estéril a la planta y reducir así el consumo de agua y energía en el proceso. El proceso se realiza mediante un chancador primario (sizer) y un seleccionador móvil, el cual está compuesto de correas transportadoras y un sensor capaz de detectar la composición del mineral y separarlo de acuerdo a la ley de cobre. La planta Bulk Sorting cuenta además con analizadores de composición de material en tiempo real, que incorporan un sistema de medición de rayos gamma producidos por la absorción de neutrones en el material, técnica conocida por sus siglas en inglés como PGNAA (Activación Rápida de Neutrones Gama).</p>	<p>https://chile.angloamerican.com/innovacion.aspx</p>
---	--	--

5.2 Lixiviación. Línea Hidrometalúrgica

5.2.1 Descripción

El proceso de lixiviación corresponde a un proceso físico-químico que consta de la disolución selectiva de los metales contenidos en el material procedente del chancado, esto mediante la aplicación de agentes lixiviantes contenidos en una solución acuosa. Como consecuencia de este proceso, los metales de interés quedan contenidos y disueltos en esta última. Previo al proceso de lixiviación, cabe señalar que se lleva a cabo el proceso de aglomeración, el cual se realiza usualmente en tambores donde se irriga el mineral con agua y el agente lixiviante [7].

Existen diferentes métodos de lixiviación de minerales, no obstante, en la mayoría de los casos, la lixiviación se aplica directamente sobre los minerales a través de un tratamiento químico, cuyas características dependerá del tipo y cantidad de reactivos que se emplee, la agitación, temperatura y presión de trabajo. Cabe señalar que, para la selección del método de lixiviación, el factor tiempo es de relevancia, sobre todo cuando se busca compatibilizar el concepto de rentabilidad económica y operacional.

A continuación, se enumeran los tipos de lixiviación:

- Lixiviación in situ
- Lixiviación en botaderos
- Lixiviación en pilas
- Lixiviación en bateas
- Lixiviación por agitación

En cuanto a la selección de agentes lixiviantes, esta se debe llevar a cabo considerando las características del mineral, las reservas y el valor potencial del yacimiento. En el caso de la lixiviación de minerales de cobre, los reactivos usualmente empleados corresponden al ácido sulfúrico para minerales oxidados, y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados [20].



Ilustración 11. Proceso de lixiviación in situ. Fuente: [21].

5.2.2 Caracterización Energética

Dentro del proceso de lixiviación, se cuenta con un conjunto de sistemas de carguío cuyo diseño depende del tamaño de las instalaciones mineras. Para el caso de faenas pequeñas cuyo tonelaje va desde los 300 a 2.000 ton/día, se emplean camiones y apiladores de correa autopropulsados, evitando el uso de cargadores frontales. En faenas mayores cuya capacidad va desde los 10.000 a los 50.000 ton/día, se emplean usualmente correas modulares articuladas (grasshoppers) que terminan en un apilador de correa o stacker. En faenas de mayores capacidades, desde 75.000 a 150.000 ton/día, es usual encontrar complejos sistemas apiladores sobre orugas alimentados por correas transportadoras estacionarias y móviles [20].

Por otra parte, el proceso de lixiviación cuenta con sistemas de riego cuya finalidad es distribuir las soluciones que contienen el agente lixivante. Dicho sistema, puede tratarse de un sistema de irrigación por goteo, o mediante aspersores tipo wobblers o sprinklers, cuya elección dependerá del nivel de evaporación y de la disponibilidad de agua de cada operación.

En Chile, la evolución del consumo energético asociado al proceso de lixiviación en el periodo de 2007 al 2013, en conjunto con los procesos de extracción por solvente y electroobtención, tiene el comportamiento que se muestra en la Ilustración 12, donde se observa que para el último año de evaluación, el consumo energético asociado al proceso de lixiviación correspondió a 972 kWh por tonelada de cobre fino electroobtenido.

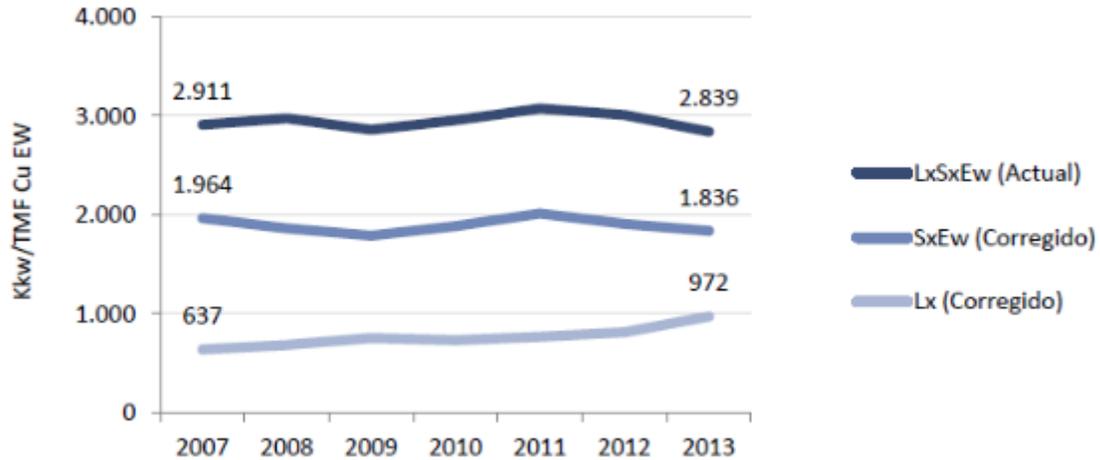


Ilustración 12. Consumo energético en kWh por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido. Fuente: [22]

En la Ilustración 13, por otra parte, se muestra la intensidad energética de los procesos LX/SX/EX correspondiente al año 2018, diferenciando entre el consumo asociado a electricidad y a combustibles, donde puede apreciarse que respecto a los otros procesos que son parte de la cadena productiva, el conjunto LX/SX/EX posee una alta intensidad energética.

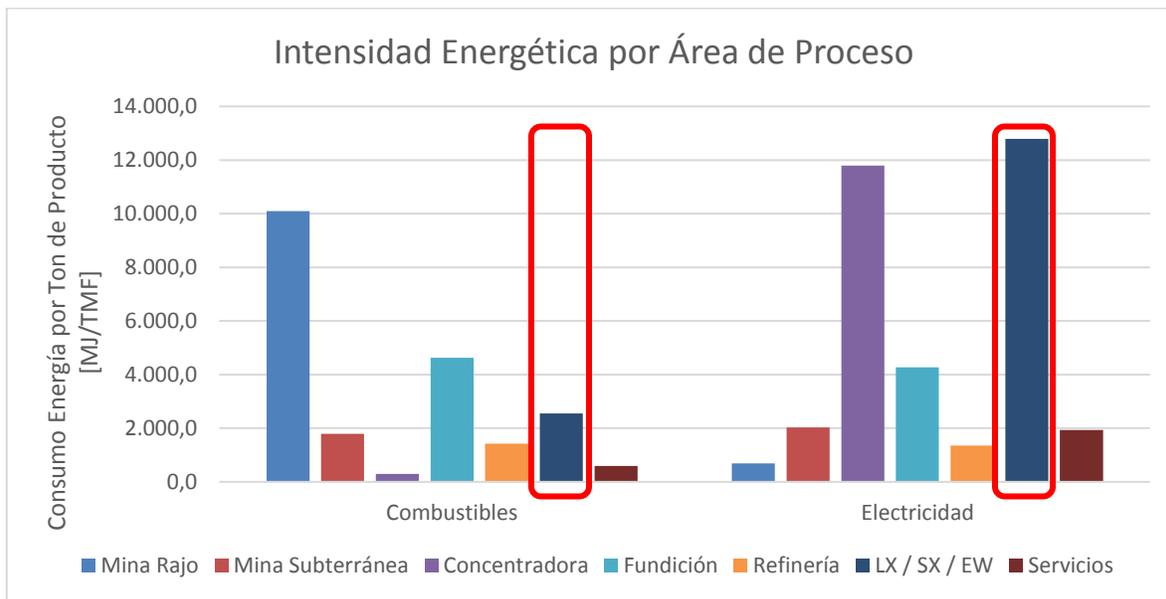


Ilustración 13. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso LX/SX/EX el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido. Fuente: en base a [5].

5.2.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.2.3.1 Implementación de Conjunto Manto de Riego. M6.1

Medida de diseño

Medida eléctrica

A causa de los requerimientos asociados a la implementación de sistemas de irrigación sobre las pilas de lixiviación y la pérdida asociada al montaje de cada elemento del sistema por separado, se ha desarrollado el Conjunto Manto Irrigador (CMI), el cual permite hacer más eficiente la operación de lixiviación y aprovechar de mejor manera los recursos. Concretamente, el CMI corresponde a un manto de riego homogéneo compuesto por líneas de regadío y un termofilm [23].

El Conjunto Manto Irrigador en efecto, permite instalar en forma simultánea los siguientes componentes: mangueras con gotero unidas a carpeta termofilm a través de camisas; contornos con mangueras planas en las cuales ingresa agua o solución lixivante, la que permite evitar el desplazamiento del manto debido al peso generado; conectares que permiten unir las mangueras con gotero al ducto alimentador existente; y un despiche que se dispone en la manguera plana para eliminar el fluido una vez concluido el ciclo.

En cuanto a los beneficios asociados a esta tecnología, estos se resumen a continuación: mantiene la linealidad de la malla de riego, disminuye la evaporación de agua en un valor cercano al 75%, permite el ahorro de tiempo de instalación y desinstalación, permite disminuir el personal para la instalación de los elementos de irrigación, disminuye los ciclos de lixiviación, así como los costos de operación [24].



Fuente: Revista Minería Chilena

5.2.3.2 Implementación de manto Termofilm en zona de riego. M6.2

Medida operacional

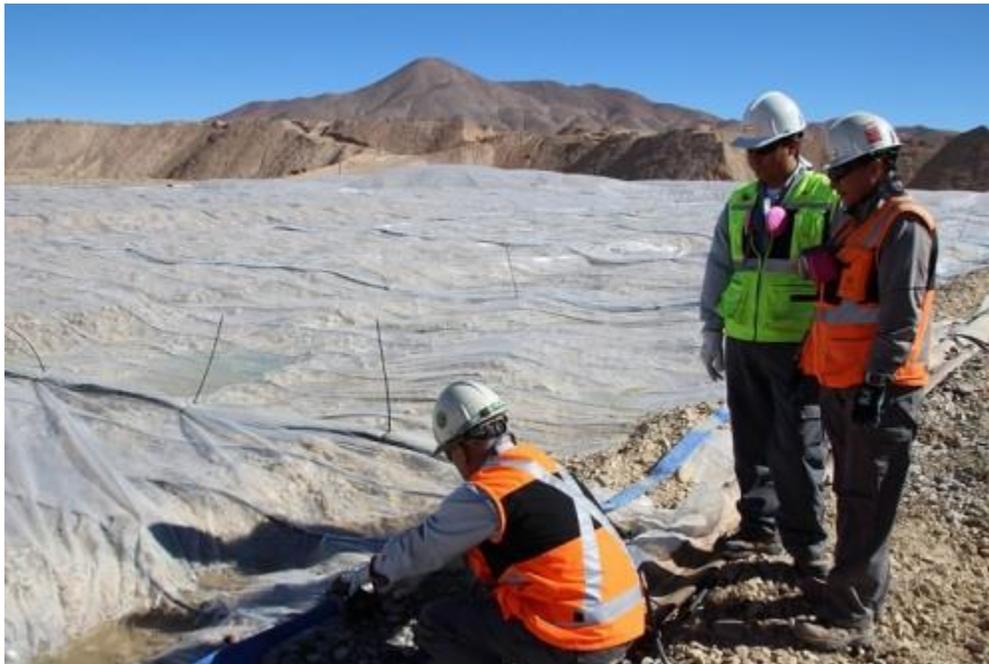
Medida eléctrica

Una membrana termofilm corresponde a una lámina de polietileno, la cual se instala sobre la red de regadío que alimenta las pilas de lixiviación. La implementación de esta tecnología trae consigo dos principales beneficios:

1. en primer lugar, el ahorro hídrico a causa de la disminución del proceso de evaporación de agua, lo cual genera la reducción de consumo energético asociado al proceso de impulsión;
2. en segundo lugar, esta implementación genera un aumento de temperatura del lecho que se encuentra debajo del film, lo que se traduce en un aumento de recuperación de cobre en las pilas.

Respecto al primer punto, la instalación de un termofilm sobre las pilas de lixiviación puede generar una reducción del 70% al 80% del recurso hídrico.

En la actualidad, su posicionamiento se lleva a cabo en mangas de 50 metros aproximadamente que se estiran de un extremo a otro, extendiendo los 50 metros manga por manga, las que se sujetan mediante amarras plásticas. Entre dichas mangas existe una separación de 6 metros que se afianzan mediante una cinta, depositándose además material encima con el fin de evitar el desplazamiento del manto [25].



Fuente: Portal Minero

5.2.3.3 Implementación de sistema de monitorización de riego de pilas de lixiviación. M6.3

Medida operacional

Medida eléctrica

La operación y mantenimiento adecuado de una pila de lixiviación son procesos complejos que implican el control de diferentes variables operacionales, variables tales como inventario de soluciones, distribución uniforme de riego en la superficie de la pila, variaciones del nivel freático, entre otras. En el proceso de riego, estos parámetros cambian en el tiempo en función del requerimiento metalúrgico del mineral tratado, deterioro del mineral y generación de apozamientos y canalizaciones, variaciones de presión y daños en el sistema de riego que se traducen en generación de áreas sin regar, o por el contrario, se traducen en exceso de riego para ciertas zonas.

En base a lo anterior, es que se propone la implementación de un sistema de monitorización para aumentar la eficiencia metalúrgica y energética mediante el manejo de las variables recientemente mencionadas. Este, debe caracterizarse por ser un sistema de inspección automático, remoto y no invasivo, el cual permita monitorizar la superficie de la pila de lixiviación y determinar en tiempo real y automáticamente, la calidad y distribución del regado, detectar apozamientos y zonas secas, canalizaciones, zonas de baja presión de riego, filtraciones, roturas de tuberías, aspersores caídos o fallas en el sistema de goteros. Eso, en efecto ayudaría a reducir la variabilidad en la calidad de riego del proceso de lixiviación, ya que entrega información cuantitativa del estado de la pila para tomar en el menor tiempo posible decisiones de relevancia que incidan en la calidad del producto.

Este tipo de innovaciones se caracterizan por contar con equipamiento de hardware y software, permitiendo este último utilizar un sistema de visión artificial y de análisis y procesamiento de imágenes de la pila. Por otra parte, el sistema de visión artificial se caracteriza por contar de un conjunto de cámaras de largo alcance (termográficas-infrarrojas y de luz visible). Los datos obtenidos por el sistema y los comentarios de los operadores se debiesen registrar en un sistema en línea para acceder a todo el registro de la pila, a partir de lo cual se identifica la calidad del riego [26].

En efecto, las ventajas asociadas a un sistema de monitorización son las siguientes [26]:

- Aumento de la calidad de riego de las pilas de lixiviación, incrementando la eficiencia metalúrgica y energética.
- Entrega de información cuantitativa para toma de decisiones.
- Realización de inspecciones remotas no invasivas.
- Reducción de riesgo para operadores en terreno.
- Disminución de pérdida de solución líquida para lixiviar.
- Mayor control en el consumo hídrico, y por tanto energético.
- Reducción de riesgos de derrumbe.
- Registro del historial de la pila.



Fuente: Expande Minería

5.2.4 Proyectos Implementados

<p>Cobertores flotantes para reducción de energía</p> <p>Mina Quebrada Blanca</p> <p>Teck Resources</p>	<p>A través del uso de esferas cobertoras flotantes, la Mina Quebrada Blanca logró aumentar hasta en 2,2°C la temperatura promedio de las piscinas de PLS y refino al reducirse las pérdidas térmicas del fluido hacia la atmósfera. Solo por el concepto de cubrir con esta tecnología de cobertores, se cuantificó el ahorro de energía en unos 8.004 MWh por año.</p> <p>(Nota: El estudio considera una eficiencia de los dispositivos de un 70% en reducción de las pérdidas de calor)</p>	<p>https://www.barrierball.cl/proyectos_detalle4</p>
<p>Manto irrigador</p> <p>Minera Escondida</p> <p>BHP</p>	<p>Se detecta que al utilizar un manto que cubra la superficie de las pilas de lixiviación disminuye la evaporación de agua y, como resultado, se reduce la cantidad de agua para irrigar las pilas y directamente se produce una disminución en el consumo de energía eléctrica por menor impulsión de agua.</p> <p>La implementación del manto de riego (cobertura de LDPE) aumenta la recuperación en un 5% sobre el ciclo de lixiviación de sulfuros, debido a que el uso de Thermofilm proporciona una mayor estabilidad en la tasa de riego, causando cambios en la recuperación que se explican por otras variables asociadas con la calidad química y biológica de la refinación.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción de consumo de agua proveniente de Monturaqui en 30 l/s y ahorro en consumo de energía eléctrica por menos bombeo de agua para irrigación por reducción de la evaporación</p>	<p>Fuente: Consejo Minero</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/08/Escondida-2018.pdf</p>

5.3 Extracción por Solventes. Línea Hidrometalúrgica

5.3.1 Descripción

El proceso de extracción por solventes (SX), también denominado intercambio iónico líquido, tiene la finalidad de purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones procedentes del proceso de lixiviación. En particular, este consiste en la distribución (en cierta proporción) del soluto o ión metálico entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico o extractante que se caracteriza por ser inmiscible al agua, y el cual además se caracteriza por tener un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, con los cuales forma compuestos organometálicos [7].

Dentro de este proceso, es posible distinguir tres etapas fundamentales, las cuales consisten en lo siguiente:

1. El líquido extractante se agrega a la solución primaria, y se une con el ión metálico.
2. Luego, el complejo extractante – ión metálico, se separa de la solución y se lleva a una solución secundaria pobre del ión metálico.
3. En la solución secundaria se produce la reextracción o descarga, en la cual el elemento de interés es devuelto a una solución acuosa que se encuentra exento de impurezas, adecuada para el proceso de electroobtención.

Los objetivos de integrar el proceso de SX dentro de la cadena metalúrgica pueden ser:

1. Separar y purificar uno o más metales de las soluciones que los contienen. La separación trata en extraer el o los metales de interés desde las soluciones, o de forma inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando el o los metales de interés en ella (purificación).
2. Concentrar los metales contenidos en la solución para disminuir volúmenes a procesos y de esta forma facilitar el tratamiento posterior.
3. Transferir los metales contenidos en una solución compleja a otra solución acuosa diferente, con el fin de simplificar el proceso posterior.



Ilustración 14. Planta de extracción por solvente. Fuente: [27]

5.3.2 Caracterización Energética

Dentro de una planta de extracción por solvente, el equipamiento básico es el siguiente:

1. Un sistema de bombeo que impulsa la fase acuosa y orgánica hacia un mezclador.
2. Un mezclador que permite la mezcla de la fase acuosa y orgánica, y el cual cuenta con un impulsor que impide el arrastre de la fase orgánica en la fase acuosa.
3. Un sedimentador de gran área y poco profundo, en el cual se separan las dos fases.
4. Una manguera distribuidora en conecta el mezclador y sedimentador y cuyo fin es asegurar un flujo laminar.
5. Equipos mezcladores decantadores del tipo perfil bajo.

En cuanto a la fuente de energía empleada en este proceso, esta corresponde fundamentalmente a energía eléctrica. A nivel país, la evolución del consumo de esta fuente de energía en el proceso de extracción por solvente (SX) en conjunto con el proceso de electroobtención (EW) entre los años 2007 y 2013, tiene el comportamiento que se presenta en la Ilustración 15, en la cual se puede observar que para el 2013, el consumo energético alcanzó los 1.836 kWh por tonelada de cobre fino electroobtenido. Asimismo, se muestra el consumo energético total del conjunto LX/SX/EW para este periodo de análisis.

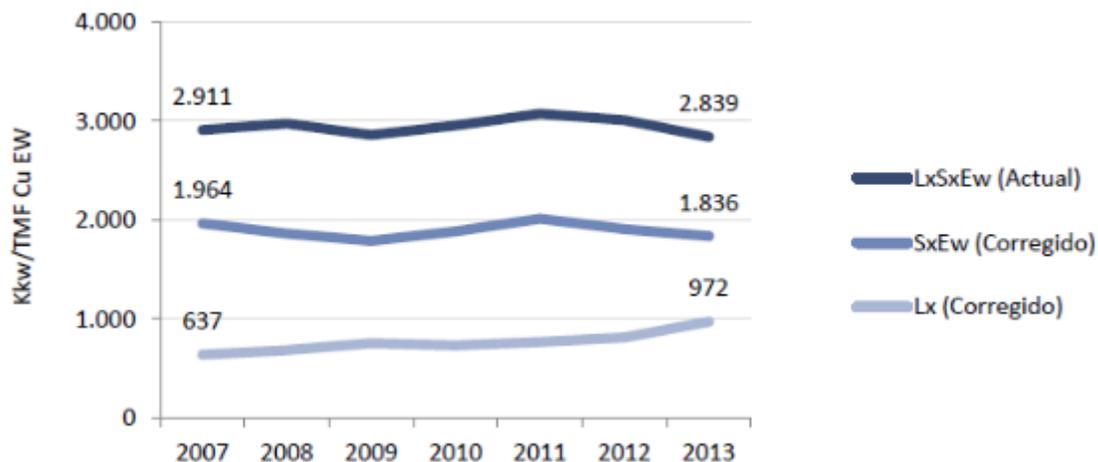


Ilustración 15. Consumo energético en kWh por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido. Fuente: [22]

En la Ilustración 16, por otra parte, se muestra la intensidad energética de los procesos LX/SX/EX correspondiente al año 2018, diferenciando entre el consumo asociado a electricidad y a combustibles, donde puede apreciarse que respecto a los otros procesos que son parte de la cadena productiva, el conjunto LX/SX/EX posee una alta intensidad energética.

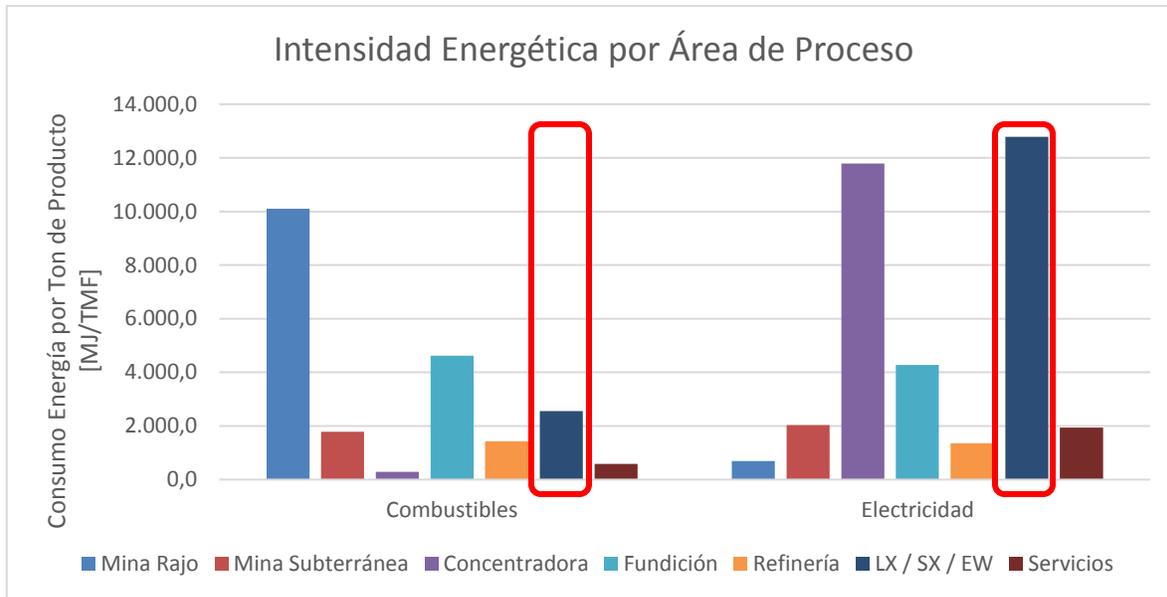


Ilustración 16. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso LX/SX/EX el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido.
Fuente: en base a [5].

5.3.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.3.3.1 Recomendaciones de proceso en impulsores de planta SX. M7.1

Medida operacional

Medida eléctrica

Los impulsores empleados en los mezcladores deben desarrollar una altura suficiente para alcanzar la tasa de flujo deseada a través de la planta de SX. Si estos no cumplen con este requisito clave, todos los demás parámetros de la planta no operarán correctamente. Esta tasa de flujo también debe ser variable, debido a las cambiantes concentraciones de cobre disuelto en el PLS (Pregnant Leach Solution). La mejor alternativa de variar el caudal es mediante controladores de frecuencia de velocidad variable, no mediante el ajuste de las válvulas de la tubería, ya que esto aumentará la turbulencia. También es deseable que durante la fase de diseño se hagan previsiones que permitan futuros aumentos de las tasas de flujo, lo cual en general se realiza para evaluar el aumento de las tasas de producción.

Los impulsores también deben crear una dispersión líquido-líquido. Lo deseable es que la distribución de las gotas sea uniforme, creando gotas lo suficientemente pequeñas para promover la transferencia de masa y a la vez lo suficientemente grandes para inhibir las pérdidas por arrastre. Los impulsores no solo deben crear la dispersión, sino que también deben mantenerla estable en la etapa primaria. Demasiado cizallamiento y turbulencia crean una amplia distribución de los tamaños de gotas. Un gran porcentaje son gotas finas, tan pequeñas que terminan en la siguiente fase como arrastre. Por otra parte, poco cizallamiento crea grandes gotas inestables que tienden a separarse rápidamente en fases. La separación de fases en las etapas de mezcla provoca una recuperación de cobre menos efectiva y limita la capacidad de producción.

Las gotas se crean por el mecanismo de ruptura, lo cual significa que las grandes gotas o aglomerados de una fase estallan en muchas gotas esféricas más pequeñas en áreas localizadas detrás de las aspas donde la caída de presión es mayor. Las gotas alargadas (estiradas) no existen en el cobre SX. El exceso de disipación de energía, la cual se define como potencia por unidad de volumen o P/V , es responsable de este fenómeno. Dependiendo de la P/V local, este estallido de gotas puede caer en cascada hacia abajo para crear gotas muy finas y a veces irrecuperables como pérdidas de arrastre. Se necesita una P/V mínima para mantener una dispersión estable. La P/V local en los vórtices de desprendimiento es típicamente un orden de magnitud mayor que la P/V general, y esta falta de homogeneidad crea la distribución de las gotas. Los impulsores ineficientes crean una P/V local muy alta y una P/V general alta, lo que causa una amplia distribución de los tamaños de gotas, finos y pérdidas de arrastre (Anderson, Giralico, Post, & Tinkler, 2009).



Figura: Planta SX. Fuente: Revista Minería Chilena

5.3.3.2 Recomendaciones generales para aumentar la eficiencia del mezclador. M7.2

Medida operacional

Medida eléctrica

El propósito final del proceso de extracción por solvente (SX) es la transferencia de una especie particular a través de una interfase acuoso-orgánica. Si las condiciones de transferencia de masa no son adecuadas, la eficiencia de extracción/reextracción serán menores a las esperadas. El funcionamiento optimizado del proceso de transferencia de masa es crucial, cualquiera sea el medio de contacto que se emplee. En el caso de los mezcladores-sedimentadores, la eficiencia del mezclador se define como la relación entre la transferencia de metal en el mezclador y la transferencia de metal en equilibrio (expresada como porcentaje). Eso puede estimarse sobre la base de las concentraciones acuosas y orgánicas que entran y salen de un determinado mezclador. Algunos factores que inciden en la eficiencia del proceso de mezclado son los siguientes (Sole, 2008):

1. Tiempo de residencia del mezclador: cuanto más prolongado sea el tiempo de residencia, mayor aproximación habrá hacia el equilibrio de la mezcla.

2. Velocidad del impulsor: la velocidad del extremo en la mayoría de los circuitos SX es de 270 a 350 m/min. Este valor es lo suficientemente alto como para asegurar una buena transferencia de masa, pero no demasiado alto como para causar un arrastre excesivo debido al alto cizallamiento y a las emulsiones de ruptura lenta. Las velocidades excesivas de los impulsores pueden generar la formación de vórtices en el mezclador y aumentar el arrastre de aire.
3. Relación orgánica-acuosa (O:A): una relación volumétrica de O:A en el compartimiento de mezcla cercana a la unidad favorece la transferencia de masa.
4. Temperatura: aumentar la temperatura mejora la eficiencia del mezclador.
5. Diseño de mezcladores e impulsores: los enfoques modernos emplean el uso de modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) para mejorar los diseños de cajas de mezcladores, deflectores e impulsores.

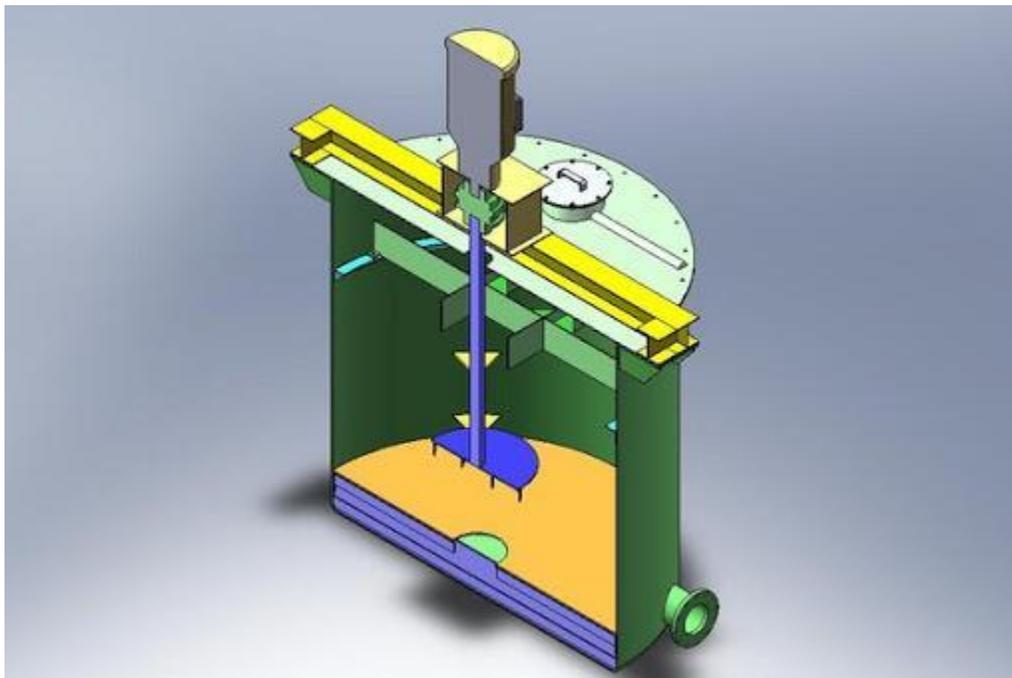


Figura: Esquema espesador. Fuente: maha.cl

5.3.3.3 Implementación de picket-fence para ayudar a la coalescencia en el proceso de sedimentación. M7.3

Medida operacional

Medida eléctrica

La instrumentación requerida en el proceso de extracción por solventes se basa en el conjunto mezclador-sedimentador. En el mezclador las fases acuosa y orgánica son mezcladas y succionadas por un agitador o impulsor. En esta etapa, se produce la transferencia de masa entre la fase acuosa y la fase orgánica. Una vez que se ha llevado a cabo la transferencia de masa, es necesario separar las fases, para lo cual se lleva la mezcla al sedimentador o decantador. En este, la mezcla comienza a separarse en sus fases constituyentes. En un comienzo las gotas de orgánico se desplazarán hacia arriba, y las gotas acuosas se desplazarán hacia abajo. A medida que se mueven comienzan a crecer

en tamaño y peso, llegando a un punto en el cual se desplazan hacia la interfase y se unen con el resto de su respectiva fase. La unión de pequeñas gotas que forman otras más grandes o la unión de gotas con su misma fase, se conoce como coalescencia.

Para ayudar al proceso de coalescencia, en el último tiempo se han incorporado a los sedimentadores una serie de tubos perpendiculares con el fin de obstaculizar el movimiento de los fluidos. Por lo general, estos se conforman de estacas contiguas que dejan pequeñas aberturas y las cuales se reconocen como picket-fence (“deflector distribuidor” en imagen), las que pueden conformarse de distintos materiales, según sea la fase a coalescer. Así, el material puede consistir en una malla de materiales plásticos para mejorar la coalescencia de la fase orgánica, o metálicas para ayudar la coalescencia de la fase acuosa (Castillo, 2012). Con la implementación de picket-fences, en efecto, el rendimiento de un sedimentador puede aumentar hasta un 30%-50% mejorando los sistemas de distribución de alimentación y de coalescencia (Sadeghi, Mohebbi, Sarrafi, & Soltani, 2011).

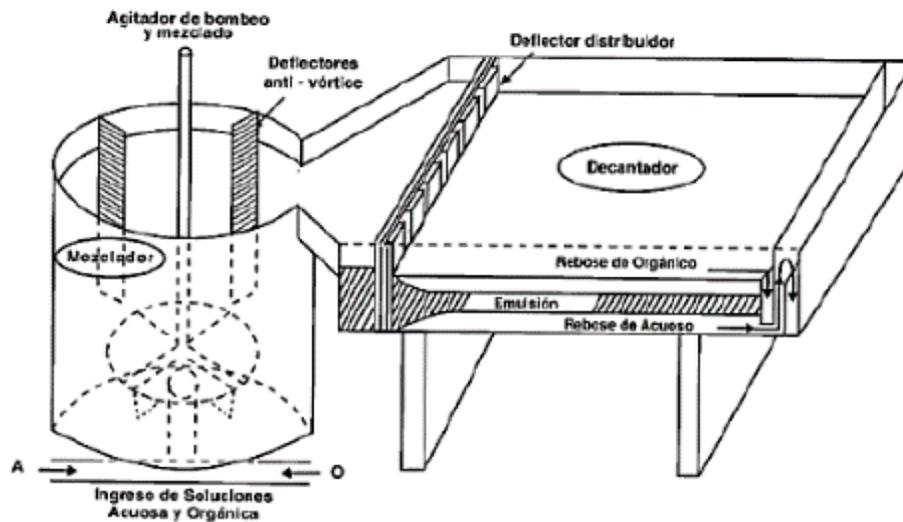


Figura: Esquema de un mezclador-sedimentador.

5.3.4 Proyectos Implementados

<p>Mejoras del Sistema de Control Calentadores SX. MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida: El sistema de encendido y apagado de las calderas de SX dependía del operador de Sala de Control, por lo tanto, no existía un proceso automático que evitará el sobrecalentamiento y por ende el mayor consumo de Diésel. Con el área de control de procesos se implementó una lógica de control automático para los calentadores lo que hizo disminuir el uso de energía a partir del 4Q de 2018 hasta mantener un nivel constante promedio en torno a los 20.000[lt/día].</p> <p>Ahorro: 2.653.800 l/año Diésel</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Freeport-El-Abra2019.pdf</p>
---	--	--

<p>Cobertores flotantes para reducción de energía</p> <p>Mina Quebrada Blanca</p> <p>Teck Resources</p>	<p>A través del uso de esferas cobertoras flotantes, la Mina Quebrada Blanca logró aumentar hasta en 2,2°C la temperatura promedio de las piscinas de PLS y refino al reducirse las pérdidas térmicas del fluido hacia la atmósfera. Solo por el concepto de cubrir con esta tecnología de cobertores, se cuantificó el ahorro de energía en unos 8.004 MWh por año.</p> <p>(Nota: El estudio considera una eficiencia de los dispositivos de un 70% en reducción de las pérdidas de calor)</p>	<p>https://www.barrierball.cl/proyectos_detalle4</p>
<p>Cambio de Iluminación SX MINERA SPENCE</p> <p>BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Se identifica un alto consumo y alta mantenibilidad en iluminación del área de SX. Se decide realizar un recambio de las luminarias por tecnología de bajo consumo LED. Cerca de 400 luminarias se cambiaron durante junio y diciembre del año 2019.</p> <p>Ahorro:</p> <p>150.488 KWh/ Año</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf</p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero.</p>

5.4 Electro-obtención. Línea Hidrometalúrgica

5.4.1 Descripción

La precipitación por reducción electrolítica, conocida como electroobtención o electrodeposición, corresponde a uno de los procedimientos más sencillos para la recuperación en forma selectiva y pura de los metales que se encuentran contenidos en solución. En términos generales, mediante un proceso de electrólisis, el metal de interés se transfiere desde la solución de lixiviación previamente acondicionada a un cátodo. Para ello, se aplica una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución) y un cátodo, en donde los iones del metal de interés (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa) depositándose en él. Para que este proceso se lleve a cabo de manera efectiva, la temperatura de trabajo del electrolito debe ser cercana a los 50°C.

Para llevar a cabo este proceso, se requiere de instalaciones especializadas denominadas celdas electrolíticas, las cuales cuentan con un sistema de circuitos eléctricos que permiten circular una corriente eléctrica continua de baja intensidad, y en las cuales se deposita la solución proveniente del proceso de extracción por solvente. Industrialmente, la fabricación y selección de las celdas electrolíticas dependerá de factores como:

1. Tipo de electrolito, si es acuoso o de sales fundidas.
2. Tipo de cátodo, si es líquido o sólido, o si es compacto, esponjoso o particulado.
3. Tipo de proceso, si es electroobtención (EW) o electrorrefinación.

Este proceso en particular es altamente empleado en la producción de cobre de uso industrial, debido al alto grado de pureza asociado al cobre electrolítico (99,99% de pureza).



Ilustración 17. Proceso de electroobtención. Fuente: [28].

5.4.2 Caracterización Energética

Dentro del proceso de electroobtención, el principal consumo energético corresponde al consumo eléctrico debido a que su operación se fundamenta en la utilización de corriente eléctrica continua, la cual se genera mediante transfo-rectificadores de corriente. Debido a su preponderancia, el consumo de energía asociada a la alimentación eléctrica de las celdas electrolíticas puede alcanzar un peso que oscila entre un 70% y 80% de la energía total del circuito LX/SX/EW [29]. Por otra parte, la energía restante que se entrega al circuito, es entregada por calentadores de agua, los cuales usualmente corresponden a equipos térmicos que operan en base a petróleo u otro combustible fósil. Dichos equipos, tienen la finalidad de entregar energía térmica al electrolito que circula entre el proceso SX y EW, cuya temperatura deseada se acerca a los 50°C.

Otros consumos de energía están asociados al uso de bombas de impulsión empleadas para el transporte de electrolito rico y de electrolito pobre, bombas de alimentación de combustible (en el caso que aplique), y bombas de alimentación de agua caliente.

En Chile, la evolución del consumo energético asociado al proceso de electroobtención en el periodo de 2007 al 2013, en conjunto con los procesos de lixiviación y extracción por solvente, tiene el comportamiento que se muestra en la Ilustración 18, donde se observa que para el último año de evaluación, el consumo energético asociado al circuito LX/SX/EX fue de 2.839 kWh por tonelada de cobre fino electroobtenido, y de 1.836 kWh por tonelada de cobre fino electroobtenido para el circuito SX/EX.

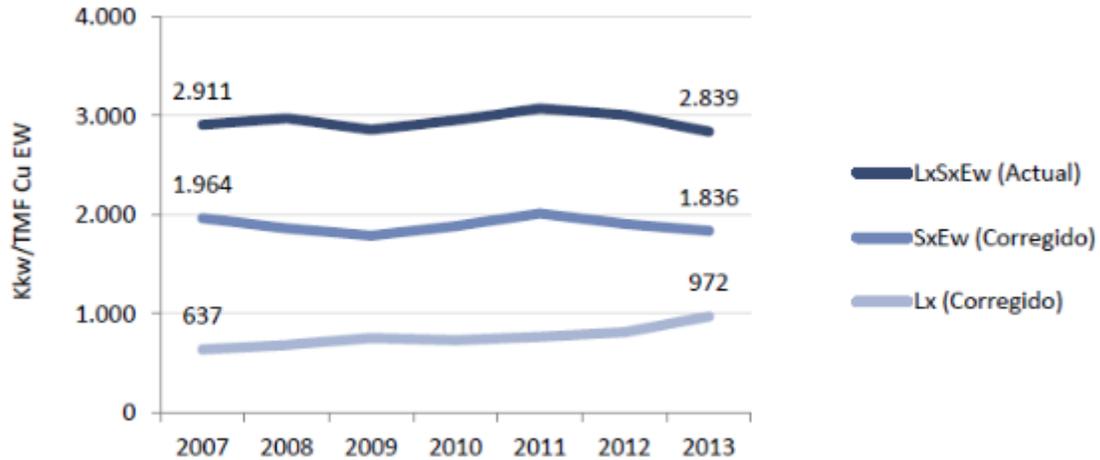


Ilustración 18. Consumo energético en kWh por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido. Fuente: [22]

En la Ilustración 19, por otra parte, se muestra la intensidad energética de los procesos LX/SX/EX correspondiente al año 2018, diferenciando entre el consumo asociado a electricidad y a combustibles, donde puede apreciarse que respecto a los otros procesos que son parte de la cadena productiva, el conjunto LX/SX/EX posee una alta intensidad energética.

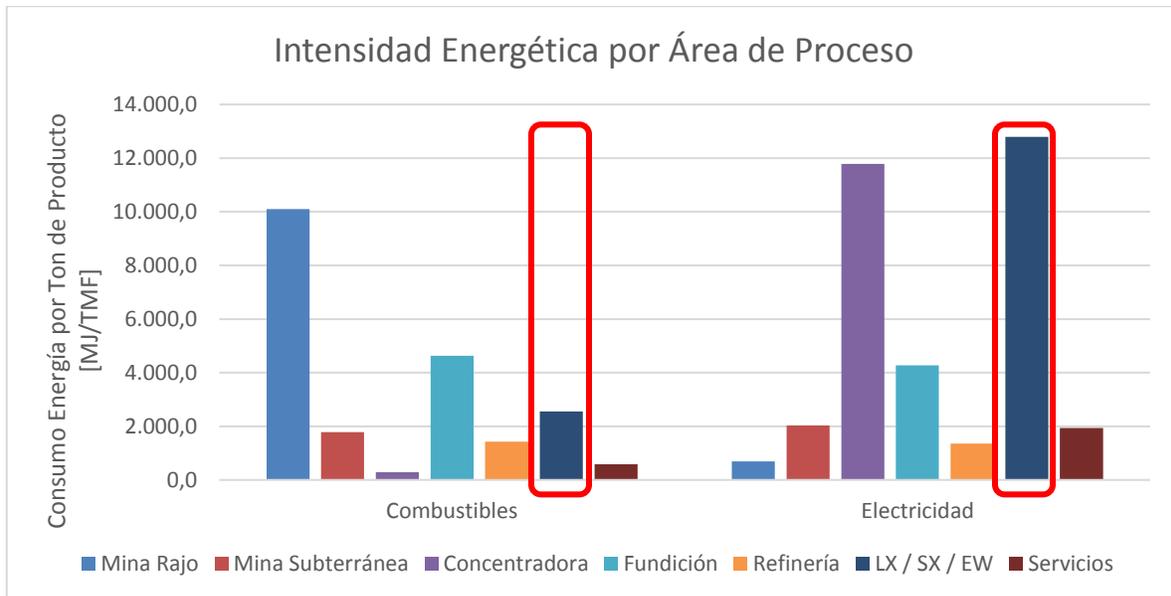


Ilustración 19. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso LX/SX/EX el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino electroobtenido.

Fuente: en base a [5].

5.4.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.4.3.1 Aislación de equipos térmicos y tuberías. M8.1

Medida operacional

Medida térmica

Para procesos térmicos en los cuales haya flujo de agua o vapor en donde se superen los 60°C, se recomienda implementar medidas de aislamiento térmico de tuberías, lo cual trae consigo el ahorro energético, protección del personal de trabajo frente a altas temperaturas superficiales de los circuitos, el aumento de eficiencia energética del proceso de entrega de calor, y una reducción de las emisiones de CO₂.

Para llevar a cabo la tarea de aislamiento, es necesario realizar una medición de: las pérdidas energéticas, máxima temperatura superficial, tiempo de enfriamiento, caída de temperatura a lo largo de las tuberías, entre otros. Por otra parte, es necesario conocer las condiciones en las cuales se encuentra el sistema en análisis, siendo dichas condiciones la temperatura a la que trabaja, el material, la forma geométrica y su utilización. Asimismo, es necesario tener en consideración las condiciones del entorno, tales como ubicación geográfica, orientación, temperatura ambiente, humedad, velocidad de viento.

En cuanto al diseño e implementación de los mecanismos de aislamiento, es necesario considerar adecuadamente los criterios para su selección, tales como:

- Exigencias funcionales: dimensiones de elementos a aislar, temperatura de trabajo, pérdidas de calor, condiciones ambientales, entre otros.
- Seguridad: de personas y funcionamiento
- Optimización de costos: asociado fundamentalmente a dimensionamiento óptimo
- Protección del medio ambiente: reducción de emisiones de CO₂
- Protección frente a la corrosión: asociado a vida útil de elementos a emplear

Una vez que se ha seleccionado el método de aislamiento, se debe proceder a recopilar parámetros de relevancia previo a su implementación. Dichos parámetros son:

- Propósito de aislamiento
- Espesores requeridos
- Relación de superficies a aislar
- Planos de las superficies a aislar
- Estimación de las superficies a aislar
- Temperaturas de operación
- Naturaleza de fluidos
- Tipo de material a aislar
- Especificaciones de aislamiento
- Requisitos asociados a características mecánicas de las instalaciones
- Situación y tipo de soportes de aislamiento

En cuanto a la estimación del espesor del aislamiento, se puede realizar una cuantificación considerando una temperatura media de la superficie que se pretende aislar, para lo cual se emplea la siguiente ecuación:

$$d = \lambda_B \left[\frac{\theta_M - \theta_L}{h_a(\theta_a - \theta_L)} - \frac{1}{h_a} - \frac{1}{h_i} \right]$$

Donde:

d es el espesor de aislamiento [m],

λ_B conductividad térmica operacional del aislamiento [W/mK],

θ_M Temperatura del medio [°C],

θ_L Temperatura ambiente [°C],

θ_a Temperatura exterior [°C],

h_i Coeficiente de transmisión de calor en interior [W/m²K],

h_B Coeficiente de transmisión de calor en exterior [W/m²K].

Respecto a la instalación del aislamiento, en esta se debe asegurar un completo cubrimiento de las superficies a aislar asegurando la uniformidad de la instalación; asimismo, los materiales deben quedar fijados de forma adecuada, no se deben dejar zonas sin material de aislamiento a menos de que se requiera lo contrario, se debe tener cuidado en el remate de los extremos del aislamiento para así evitar posibles fisuras, entre otros [30].

Por último, esta medida de eficiencia energética tendría un ahorro en el uso de combustible que puede variar en un 0,01% a 8,3%, teniendo un promedio de 1,59% [31].



5.4.3.2 Estimación de rendimiento y evaluación de recambio de calderas poco eficientes. M8.2

Medida operacional

Medida térmica

El recambio de calderas se recomienda para cuando los rendimientos de dichos equipos son inferiores a rendimientos nominales (70%-80%). Para evaluar la necesidad de cambiar los equipos térmicos, se requiere conocer en primera instancia la eficiencia de aquellos. En este sentido, es importante tener en consideración que la eficiencia de una caldera se relaciona directamente con la carga de operación, por lo que deberá realizar una evaluación que permita obtener una curva de rendimiento que esté vinculada a diferentes puntos de operación. En cuanto a los métodos de estimación de la eficiencia de calderas, se reconocen fundamentalmente dos, los cuales corresponden al método directo e indirecto [32].

El **método directo** es un método simplificado que utiliza la definición del rendimiento como la razón entre la energía útil (producción de vapor por el cambio de entalpía en la caldera) y el consumo de combustible asociado a la generación de calor. La siguiente ecuación estima la eficiencia de la caldera bajo el método directo:

$$Eficiencia[\%] = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot PCI} \cdot 100\%$$

Donde,

\dot{m}_v es el flujo másico de vapor [kg/h]

\dot{m}_c es el flujo másico de combustible [kg/h]

h_v es la entalpía específica del flujo de vapor [kcal/kg]

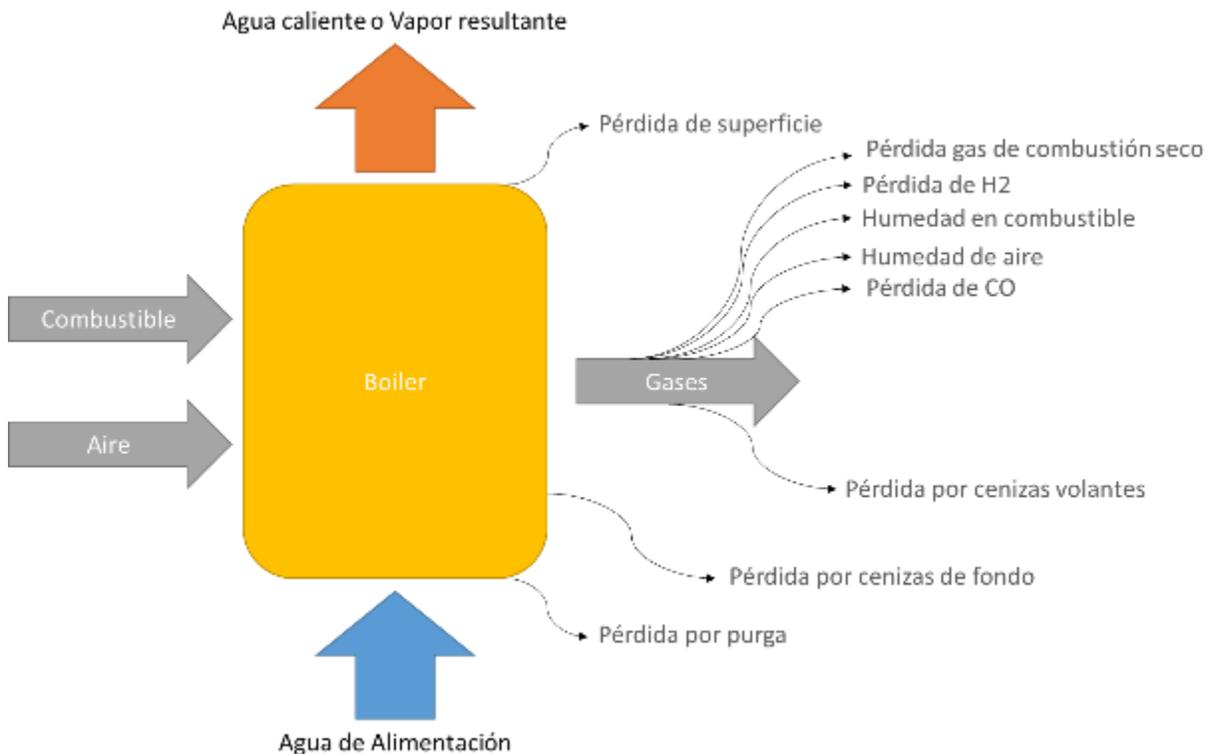
h_a es la entalpía específica del flujo de agua de alimentación [kcal/kg]

PCI es el poder calorífico inferior del combustible en uso [kcal/kg]

Por otra parte, el **método indirecto** permite determinar la eficiencia de una caldera mediante la estimación de cada una de las pérdidas existentes, expresadas en porcentaje. Respecto a estas últimas, se puede decir que la pérdida de energía de mayor relevancia corresponde a las pérdidas asociadas a los gases de combustión, representando entre un 80% y 90% de las pérdidas de energía de una caldera. La ecuación que describe este método se muestra a continuación:

$$Eficiencia[\%] = 100\% - \sum_i Pe_i[\%]$$

Donde, Pe_i corresponde a la Pérdida Energética i expresada en porcentaje.



Una vez estimada la eficiencia de la caldera, se procede a seleccionar una caldera de tecnología eficiente. Dentro de la gama de calderas, se encuentra la convencional, la caldera de condensación (110% de rendimiento), la caldera de baja temperatura, entre otras.

5.4.3.3 Optimización de exceso de aire en combustión de calderas. M8.3

Medida operacional

Medida térmica

Es importante reducir el elevado exceso de aire que se emplea para el proceso de combustión, ya que esto trae consigo una cantidad adicional de gases atmosféricos que no reaccionan en este proceso, absorben calor, reduciendo la eficiencia del equipo térmico. Para ello, se propone una medida de mejora asociada a la operación y mantenimiento de las calderas mediante la implementación de un sistema de control de combustión, así como mediante la optimización de la relación aire/combustible. A continuación, se presentan los excesos de aire recomendados en función del tipo de combustible que se emplee.

Tabla 3. Exceso de aire recomendado para la combustión de diferentes combustibles. Fuente: [31]

Combustible	Exceso de Aire [%]
Gas natural	5-10
Propano	5-10
Gas Coque	5-10
Fuel Oil N°6	10-15

Previo a la implementación de esta medida, es necesario realizar pruebas con un analizador de gases de combustión que permitan cuantificar los valores de exceso de aire en un régimen de alto fuego, medio y bajo, tomando en consideración el tiempo en el que trabaja la caldera en cada uno de estos regímenes. Luego, se deberán aplicar las acciones adecuadas para lograr el exceso de aire requerido.

A continuación, se presenta una lista de acciones a implementar en el ajuste de la relación aire/combustible [31].

N°	Actividad	Sitio
1	Revisión de controles de caldera y sistema eléctrico para asegurar que ésta opera de forma adecuada.	Caldera
2	Revisión del sistema de inyección de combustible, el que deberá limpiarse, asegurándose además que el diámetro se acerque al recomendado por el fabricante.	Conjunto de quemador de caldera y/o sistema de inyección de combustible
3	Revisión de las condiciones de inyección de combustible, tales como temperatura y presión de inyección. Cabe señalar que una	Sistema de acondicionamiento de combustible y

	temperatura baja en el bunker o una falta de presión de inyección reducen la eficiencia de combustión.	sistema de inyección de éste
4	Disponibilidad y operatividad de equipos de medición (analizador de gases) que permitan estimar la cantidad de exceso de aire	Analizador de gases
5	Realizar análisis de gases en la salida de la chimenea, donde deberá haber un punto de muestro en el cual se pueda introducir la sonda del analizador de gases en los tres regímenes de fuego (alto, medio, bajo)	Chimenea de caldera y conjunto quemador
6	Una vez realizadas las mediciones en los tres regímenes y determinado el exceso de aire en cada uno de ellos, es necesario ajustar la alimentación de aire de tal forma que no sobrepase los valores estipulados anteriormente. Esto se realiza para los tres regímenes. Para este ajuste se recomienda ver las especificaciones del fabricante	Chimenea de caldera y conjunto quemador

En efecto, se estima que con esta medida es posible alcanzar ahorros del 0,33% a 20% con respecto al consumo de combustible, teniendo un ahorro promedio de energía utilizada en vapor del 3,3%. Por otra parte, el costo de implementación tiene un periodo simple de recuperación de la inversión de 0,5 años, promedio.

5.4.3.4 Reparación de fugas en sistema de generación de vapor. M8.4

Medida operacional

Medida térmica

Uno de los problemas que se presenta en el sistema de distribución de vapor, en las líneas de vapor, válvulas, bridas, uniones, tanques de proceso, intercambiadores de calor, serpentines, etc., es la presencia de fugas de vapor, las cuales representan pérdidas energéticas y de agua tratada. Por lo general, las pérdidas normales de “agua” en el circuito de vapor/condensados de una empresa no debiese superar el 5%, siendo tales pérdidas atribuibles a venteos y purgas de la caldera, y no a fugas de vapor, las cuales son básicamente generadas por fallas en el sistema. Por tanto, en el caso que exista la necesidad de reponer por sobre el 5% de agua en el sistema, es probable que existan fugas que debiesen repararse.

Para solucionar esta problemática, se recomienda realizar las siguientes acciones:

N°	Actividad	Sitio
1	Una práctica recomendable es contar con un layout y una codificación de los diferentes equipos y líneas que conforman el sistema de generación, distribución y suministro de vapor, ya que mediante estos será posible: <ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar la ubicación de los equipos que integran el sistema de generación de vapor. 2. Identificar los elementos que integran el sistema de distribución, tales como cabezales distribuidores de vapor, 	Sistema de generación de vapor / Sistema de distribución de vapor/ Sistema consumidor

N°	Actividad	Sitio
	<p>válvulas, regulares de presión, manómetros, termómetros, etc.</p> <p>3. Identificar las áreas donde se encuentran los equipos consumidores de calor, además de ubicar la línea de retorno de condensados.</p>	
2	<p>Llevar a cabo recorridos de inspección mediante:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Planos o layouts con la codificación de los equipos y elementos a revisar. 2. Listado de equipos y elementos para identificar el tipo de mantenimiento. 	Sistema de generación de vapor / Sistema de distribución de vapor/ Sistema consumidor
3	<p>En función de los resultados de la inspección, las reparaciones deberán programarse en función de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La ubicación de la fuga, 2. La complejidad de la fuga, 3. El tipo de operación. <p>No es recomendable por ningún motivo reparar cuando el proceso se encuentre en operación, debido a que esto puede causar altos riesgos laborales.</p>	Departamento de mantenimiento
4	<p>Reparar las fugas llevando a cabo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cambio de juntas, 2. Ajuste de vástagos, 3. Cambio de sección de tubería, esto en lugar de únicamente soldar la sección que presenta la fuga, 4. Sustitución de accesorios (válvula, regulador de presión, etc.). 	Sistema de generación de vapor / Sistema de distribución de vapor/ Sistema consumidor

En promedio, la reparación de fugas puede traer consigo ahorros energéticos de entre el 0,03% y el 1,8% de combustible de la caldera. Con relación al periodo simple de recuperación de la inversión, se ha observado que este tipo de medidas tienen una recuperación prácticamente inmediata, mucho menor a un año. Esto debido a que, por lo general, se requiere de baja inversión, o inversiones prácticamente nulas [31].

5.4.3.5 Medidas de eficiencia energética generales para calderas y sistemas complementarios. M8.5

Medida operacional

Medida térmica

A continuación, se presenta un conjunto de medidas de eficiencia energética que se pueden aplicar a sistemas térmicos como calderas y elementos complementarios, además del respectivo ahorro de

combustible generado por la implementación de tales medidas. Cabe señalar que tales valores son el resultado de un estudio aplicado a diferentes empresas bajo el Proyecto de Eficiencia Energética en el Área Térmica auspiciado por el Programa USAID de Excelencia Ambiental y Laboral.

N°	Descripción de medida de ahorro energético	Ahorro de Combustible %		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	Instalación de aislamiento térmico en líneas, accesorios, tanques y otros elementos de media-alta temperatura que carece de este.	0,01	8,3	1,59
2	Ajuste de la relación aire combustible en función del tipo de combustible y de las condiciones operativas del sistema de combustión.	0,33	20	3,32
3	Eliminación de fugas de vapor.	0,03	1,8	0,65
4	Recuperación de condensador para su reingreso a la caldera, minimizando el uso de agua de reposición.	0,10	5,8	1,82
5	Recuperación de calor de purgas de la caldera para aumentar la temperatura de otro fluido.	0,32	5,1	1,88
6	Optimización de purgas en la caldera, en función de las recomendaciones del fabricante de calderas y de referencias imparciales y técnicas.	0,38	6,1	2,11
7	Recuperación de calor de los gases de la chimenea para aumentar la temperatura de algún fluido útil.	1,84	8,8	4,06
8	Inspección, mantenimiento, reemplazo y/o implementación de trampas para condensados.	0,01	3,8	1,27
9	Para empresas con más de una caldera en operación, procurar la administración eficiente de la carga de las calderas (demanda de vapor en proceso).	0,17	0,7	0,47
10	Reducción de la presión del generador de vapor, hasta presiones adecuadas para el proceso, considerando las pérdidas asociadas a la red de distribución.	0,26	1,3	0,65
11	Instalación de un serpentín de vapor al interior de un tanque de agua caliente para utilizar en otro proceso.	0,39	9,0	3,47
12	Desincrustación de tuberías internas en calderas	0,27	3,1	1,67

5.4.3.6 Información y recomendaciones generales asociadas a proceso EW. M8.6

Medida operacional

Medida eléctrica

El nivel de producción y eficiencia energética de los procesos de EW de cobre están determinados por lo siguiente: 1) la eficiencia de corriente de las celdas electrolíticas y 2) las pérdidas de energía producidas en las resistencias eléctricas de los componentes del proceso. La eficiencia de corriente en las celdas de EW de cobre se define por la eficiencia de reacción de la electrólisis, y cuya magnitud oscila normalmente entre el 82% y el 92%. La corriente no utilizada se desperdicia a través de cortocircuitos, corrientes parásitas, reoxidación de cátodos y formación de subproductos en reacciones parásitas. Las pérdidas de energía en los componentes del proceso dependen del voltaje de la celda en funcionamiento y de la densidad de corriente a través de los electrodos. Los componentes típicos que forman parte del proceso corresponden a transformadores de potencia, filtros pasivos, rectificadores de alta corriente, reactores de interfase, barras colectoras de corriente continua y celdas electrolíticas.

En las celdas electrolíticas, las pérdidas de energía son producidas por cortocircuitos metalúrgicos. El factor clave para disminuir estas pérdidas energéticas es reducir la dispersión de la corriente entre los pares ánodo-cátodo, y/o las resistencias del proceso. Los cortocircuitos metalúrgicos son depósitos de metal que crecen anormalmente entre los electrodos reduciendo la resistencia del electrolito. Normalmente, este fenómeno aumenta la corriente en los cátodos implicados hasta 1.500 A, reduciendo en efecto la corriente de los cátodos vecinos, lo cual afecta la dinámica general de la celda. Por otra parte, existen casos críticos en los cuales la sobrecorriente se concentra en un área pequeña produciendo fuertes pérdidas de energía durante largos periodos de tiempo. En condiciones normales, pueden ocurrir tres o más cortocircuitos por celda en cada ciclo catódico, lo cual representa el 8% de los cátodos de los depósitos.

Por otra parte, el voltaje de la celda en los procesos de EW depende del potencial de equilibrio termodinámico de las reacciones del ánodo y del cátodo (conocido como voltaje de reacción de la celda), de las sobretensiones cinéticas y de la resistencia óhmica del electrolito y de los contactos. Para producir la electrólisis, estos potenciales deben ser superados aplicando un potencial más alto entre cada par cátodo-ánodo. En la práctica, el electrolito produce la mayor resistencia para que la corriente fluya. La resistencia del electrolito depende de la resistividad del electrolito y de la distancia del electrodo. La resistividad del electrolito es una función compleja de la composición del electrolito y la temperatura, por lo tanto, reducir la resistencia del electrolito variando su composición no ofrece muchas opciones de trabajo. Por otra parte, la reducción de la distancia de los electrodos en las celdas de EW representa una forma efectiva para reducir las pérdidas de energía. No obstante, la distancia entre los electrodos debe ser mayor para reducir la posibilidad de incurrir en cortocircuitos y de dispersar la corriente. En base a estos dos puntos, se recomienda trabajar con una distancia de diseño óptima para satisfacer las condiciones de operación (Wiechmann & Aqueveque, 2010).



Figura: Planta de electroobtención. Fuente: Camiper – Cámara minera del Perú

5.4.3.7 Implementación de barras interceldas. M8.7

Medida operacional

Medida eléctrica

La cantidad y la calidad del cobre depositado en los cátodos, así como la eficiencia del proceso, dependen de la densidad de corriente a través de los electrodos. Este parámetro operacional se estima dividiendo la corriente media del cátodo por el área de ambas caras de éste. Idealmente, todas las densidades de corriente de los cátodos deben mantenerse lo más cerca posible a la densidad de corriente objetivo. Esto debe realizarse para asegurar una dinámica óptima del proceso a fin de reducir los tiempos de cosecha y aumentar la producción anual de cobre con un mínimo costo energético. Las plantas EW utilizan una variedad de configuraciones Walker basadas en barras interceldas. Estas barras interceldas están diseñadas para asegurar un voltaje común para cada par cátodo-ánodo en una celda cualquiera. Dado que las resistencias entre los pares de electrodos difieren debido a desajustes geométricos, químicos y eléctricos, el uso de estas barras interceldas da como resultado una alta dispersión de corriente entre los cátodos. Las barras interceldas de clase Walker se caracterizan por tener niveles de capacidad de cortocircuito de hasta el 300% de la corriente operativa de los cátodos. De esta manera las corrientes superiores a 1.500 A fluyen a través de los electrodos en cortocircuito. Estos cortocircuitos producen daños en los cátodos, provocan pérdidas de energía y disminuyen la calidad física de los cátodos.

Para dar solución a esta problemática se ha creado la tecnología Optibar, la cual fuerza el equilibrio de corriente. Esta tecnología ayuda a compensar las asimetrías geométricas, los desalineamientos, las resistencias de contacto y la dispersión de electrolitos. Una barra intercelda Optibar conecta en

serie los pares ánodo-cátodo de las celdas continuas, generando trayectorias eléctricas preferentes o canales de corriente, los cuales comparten resistencias equivalentes a través de los cátodos de las celdas. Asimismo, esta tecnología permite ligeras diferencias de voltaje entre los electrodos para compensar la dispersión en las resistencias de contacto y la alineación de los electrodos. Por último, la conexión Optibar se caracteriza por altas resistencias de cortocircuito (resistencia de Thévenin), que evitan las altas sobrecorrientes. Esta característica mejora la eficiencia de corriente de procesos y la calidad del producto. En efecto, el ahorro de energía se logra mediante (Wiechmann & Aqueveque, 2010):

- 1) Reducción de las frecuencias de cortocircuito a un tercio.
- 2) Limitación de la corriente de cortocircuito a un máximo de 1,5 p.u.
- 3) Reducción de la dispersión de la corriente disminuye el voltaje de la celda en un 4%, lo que significa una reducción del 4% de la energía de las celdas EW.

Los resultados de aplicar la tecnología Optibar se asocian a un aumento de la eficiencia actual del proceso de un 1,5% y un incremento del 3% de la eficiencia de la energía eléctrica en la celda.

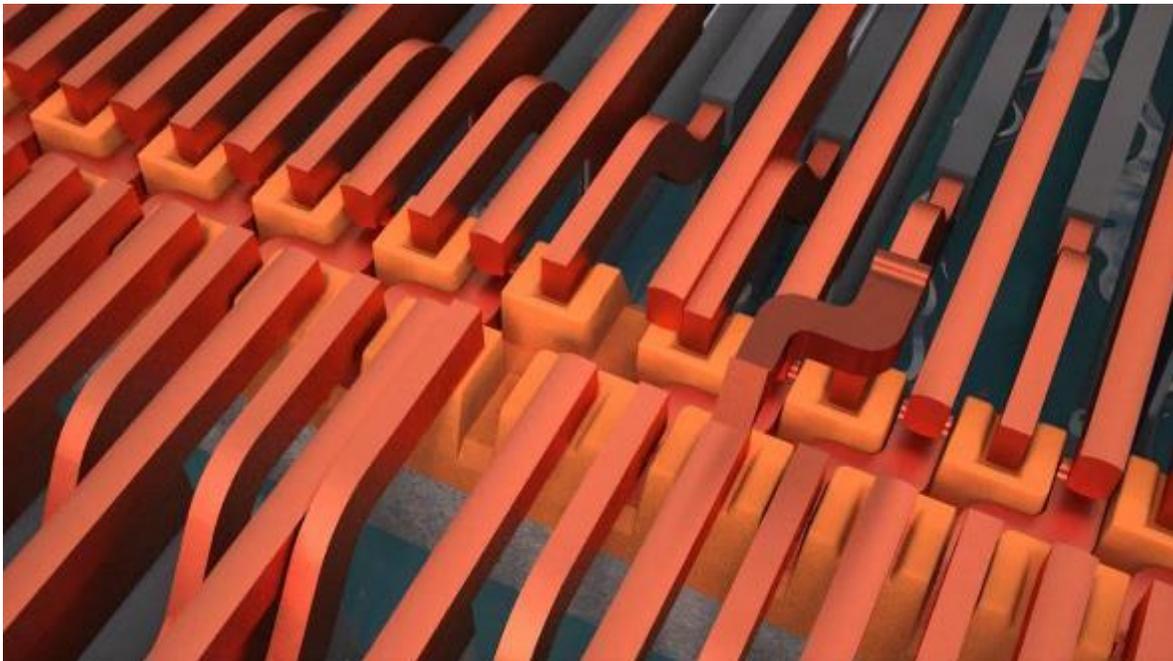


Figura: Interceldas Optibar. Fuente: Tec-Q

5.4.3.8 Detección de cortocircuitos aplicados a barras interceldas. M8.8

Medida operacional

Medida eléctrica

Un fenómeno muy dañino pero común en los procesos de electro-obtención y electrorrefinación es el cortocircuito metalúrgico. Estos cortocircuitos producidos en las celdas electrolíticas pueden afectar drásticamente la eficiencia del proceso. Durante un cortocircuito, el cobre se deposita en una zona muy pequeña del cátodo en cuestión, lo que reduce la distancia entre los cátodos adyacentes y, por consiguiente, la resistencia electrolítica entre ellos. Como consecuencia, pueden dispersarse

grandes cantidades de energía durante largos periodos de tiempo, lo que afecta negativamente a la deposición de cobre en los cátodos vecinos.

Las barras equipotenciales convencionales, como las empleadas en una configuración Walker, están intrínsecamente sujetas a una alta intensidad de corriente durante un cortocircuito metalúrgico (llegando hasta 3 p.u. de la corriente del proceso catódico) debido al voltaje equipotencial impuesto en cada celda. Comúnmente, la instrumentación empleada para detectar cortocircuitos metalúrgicos consiste en gaussímetros y cámaras infrarrojas. No obstante, al implementar la tecnología Optibar, en donde las corrientes de cortocircuito no exceden de 1,5 p.u. de la corriente del proceso, el campo magnético y el aumento de la temperatura son sólo ligeramente más altos durante eventos de cortocircuito, lo cual hace que la detección de este fenómeno mediante dichos métodos sea poco efectiva.

Para solucionar esta problemática, se propone realizar mediciones de voltaje del conjunto ánodo-cátodo. Esta medición puede realizarse directamente en los segmentos de conexión de las barras interceldas. En la tabla se muestran los componentes de voltaje en una celda industrial de electrorefinación. El principal componente de voltaje es el voltaje del electrolito. En un evento de cortocircuito, la resistencia del electrolito se reduce junto con la formación de la dendrita de cobre. Esto produce una reducción del 50% del voltaje de la celda. El voltaje debiese medirse entre un segmento de conexión del cátodo y los dos segmentos de conexión del ánodo superior. Esto mostraría si existe un cortocircuito en alguna de las caras del cátodo (Aqueveque & Wiechmann, 2009).

Tabla. Componentes de voltaje de una celda de cobre. Fuente: (Aqueveque & Wiechmann, 2009)

	Voltage [mV]
Voltage drop in the electrolyte	110-130
Cathode overpotential and polarization	40-80
Anode and Cathode electrical connections	30-60
Busbar and lead losses	10-20
Anode polarization	0-10
Voltage Cell	230-270

El sistema de detección debiese implementarse dentro de la intercelda para evitar la interferencia con la operación del proceso. Por otra parte, el estado de cortocircuito del depósito puede actualizarse cada 10 s (Aqueveque & Wiechmann, 2009).

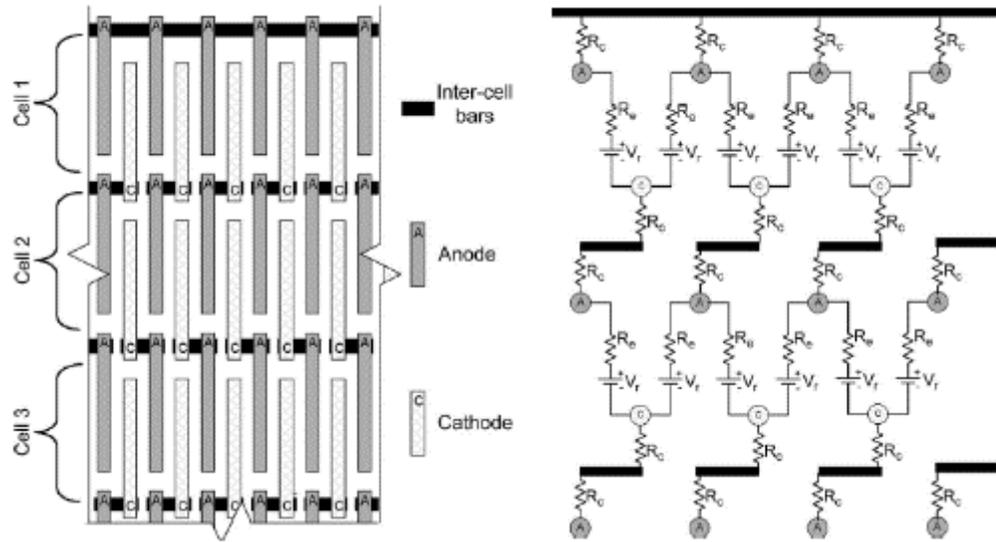


Figura. Configuración empleando tecnología intercelda. Fuente: (Aqueveque & Wiechmann, 2009)

5.4.4 Proyectos Implementados

<p>Mejora integral de nave de EW.</p> <p>MINERA SPENCE</p> <p>BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Dada la pérdida de eficiencia en circuitos de EW, por disminución de capacidad de los electrodos se realizó un cambio de un 30 % del universo de ánodos en las naves.</p> <p>Dentro del plan de mejora, se implementan las siguientes medidas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cambio de ánodos de plomo (12.000 ánodos) -Plan de mantenimiento integral de celdas de EW. (Esta limpieza responde a la frecuencia máxima de desborre por celda < a 180 días). -Instalación de separadores anódicos, para mantener el distanciamiento entre electrodos, reducir los cortocircuitos y aumentar la eficiencia de corriente - Instalación de cámaras termográficas en las celdas para el monitoreo. <p>El objetivo del plan de mejora es llevar la eficiencia de corriente a la eficiencia de diseño (90%). Se estima un ahorro de un 5% al año de la energía eléctrica de EW.</p> <p>Ahorro:</p> <p>7.431.026 kWh/año</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf</p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero.</p>
---	---	--

<p>Consumo Específico de Energía Nave EW</p> <p>MINERA CENTINELA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida:</p> <p>Disminuir el consumo específico de energía en la nave EW debido a mejoras operacionales.</p> <p>Ahorro:</p> <p>3.245 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 1.262 [tCO₂eq]/año)</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero.</p>
<p>Nuevo Sistema de Capping en EW.</p> <p>MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>Debido a la edad de la planta, las celdas se han desplazado, creando espacios entre ellas. Esto está contribuyendo a una mala distribución de corriente. Para reducir la desalineación y mejorar la distribución de corriente, se instaló un nuevo sistema de contacto. Este sistema tiene una barra más ancha, que aumenta el área de contacto, así como también incrementa el cobre por amperio para reducir la temperatura del bus. El ahorro de energía por disminución de pérdidas eléctricas por temperatura o mal contacto de celdas tras la implementación es de 2.293kWh/celda. La diferencia de esta nueva tecnología de Capping con la de doble contacto es de US\$2.300/celda. El ahorro anual es de lo que equivale aproximadamente a US\$338.206</p> <p>Esta medida fue Premiada por la Agencia de Sostenibilidad el año 2019 como la mejor iniciativa en la Categoría Silver.</p> <p>Ahorro:</p> <p>4.228 MWh/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Freeport_El-Abra2019.pdf</p>
<p>Mejoras nave EW (rigidizadores, reducción nave EW, mejora T°).</p> <p>TECK RESOURCES CHILE.2018</p>	<p>Medida:</p> <p>Se requiere asegurar la correcta conexión de los ánodos de EW en las barras para aprovechar y maximizar el uso de corriente DC.</p> <p>Se instalan barras rigidizadores que mejoran la unión entre la oreja del ánodo de cobre con la barra de potencial y así asegurar el mejor contacto eléctrico posible y evitar las pérdidas.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 1,4 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 167 [tCO₂-e]/año</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>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Implementación de medidas preventivas de cortocircuitos.</p> <p>Minera Spence</p>	<p>El Tankhouse Thermal Monitoring System (TTMS) y otras mejoras asociadas lograron que Minera Spence, aumentara si eficiencia energética y eliminara cortocircuitos en las celdas. Su objetivo principal es detectar pérdidas de calor o cortocircuitos entre cátodo y ánodos durante el ciclo de recolección. El sistema realiza escaneos automáticos mediante el uso de cámaras termográficas montadas en las grúas del depósito, que una vez completadas generan un informe con su ubicación exacta que permite al usuario tomar medidas inmediatas para eliminar los cortocircuitos. La eliminación de cortos mejora la eficiencia energética y produce una operación más segura para los trabajadores.</p> <p>Ahorro: Aumento de la eficiencia de corriente en la nave de electrowinning (EW) en al menos 9%.</p>	<p>http://www.minmineria.gob.cl/media/2017/05/2016.08.31-Casos-de-Innovacion-de-Proveedores-en-la-Mineria-Chilena.pdf</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 Minera Cerro Verde, «Chancado Primario Sociedad Minera Cerro Verde,» [En línea]. Available:
] <https://i.ytimg.com/vi/w8j1k5eeoNg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [3 P. Navarro, «Slide Share,» [En línea]. Available:
] <https://es.slideshare.net/BrunoVillanueva/30712-materialdeestudiopartei-diap180>. [Último
] acceso: 2020].
- [4 J. Jeswiet y A. Szekeres, «Energy Consumption in Mining Comminution,» Canadá, 2016.
]
- [5 Cochilco, «Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019,» 2020.
]
- [6 Balasubramanian, «Size reduction by crushing methods,» Mysore.
]
- [7 Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006.
]
- [8 McLanahan, «Zarandas Vibratorias,» [En línea]. Available:
] <https://www.mclanahan.com/es/productos/zarandas-vibratorias>. [Último acceso: 2020].
- [9 Rivet, «Catálogo Rivet,» 2006. [En línea].
]
- [1 Mackorn, «Mackorn Products,» [En línea]. [Último acceso: 2020].
0]
- [1 J. Sandoval, «Mejoramiento Plan de Mantenimiento Área Seca, Chancado Fino, Gerencia de
1] Mantención Cátodos, Minera Escondida Limitada,» Concepción, Chile, 2015.
- [1 Salas Hnos Ltda, «Catálogo Ingeniería y Construcciones Salas Hnos Ltda,» Santiago de Chile.
2]
- [1 K. Shah, «Construction, Working and Maintance of Crusher for Crushing Bulk Materials,» 2018.
3]
- [1 Greg Adel, Toni Kojovic y Darren Thornton, «Mine-to-Mill Optimization of Aggregate
4] Production,» 2006.

- [1 M. Moncada Merino, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio de harnero 5] vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos,» Concepción, 2017.
- [1 D. Escobar Moscoso, «Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero 6] vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos,» 2016.
- [1 J. Saavedra Vidal, «Control de presión de agua mediante variador de frecuencia y motobomba,» 7] 2007.
- [1 Electro Industria, 2017. [En línea]. Available: 8] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&ni=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vdf>. [Último acceso: 2020].
- [1 Vibra Screener, 2016. [En línea]. Available: [https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-9\] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/](https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-9] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/).
- [2 Codelco, «Lixiviación,» Chile, 2019. 0]
- [2 SPD, «Minera Tres Valles recibe fondo de Anglo American para impulsar proyectos,» [En línea]. 1] Available: <https://southpacificdrilling.com/minera-tres-valles-recibe-fondos-de-anglo-american-para-impulsar-proyectos/>. [Último acceso: 2020].
- [2 Dirección de Estudios y Políticas Públicas, «Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética 2] en Minería».
- [2 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/).
- [2 M. Acuña Reyes y A. Arancibia Reyes, «Patentscope,» 2013. [En línea]. Available: 4] <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2013049953>.
- [2 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/>.
- [2 Expande, «Casos de innovación de proveedores en la minería chilena,» 2018. 6]
- [2 Minería Chilena, «Características de plantas SX pequeñas y medianas,» [En línea]. Available: 7] <https://www.mch.cl/reportajes/caracteristicas-de-plantas-sx-pequenas-y-medianas/#>. [Último acceso: 2020].
- [2 Camiper, «Metalurgia: ¿Qué es la electroobtención y para qué sirve?,» 2019. [En línea]. 8] Available: <https://camiper.com/tiempominero/wp-content/uploads/2019/10/metalurgia-electroobtencion.jpg>. [Último acceso: 2020].

- [2 B. Valenzuela, «Balance Térmico de Soluciones Asociadas al Circuito SX-EW,» 2012.
9]
- [3 Fenercom, «Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial,» 2017.
0]
- [3 USAID, «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor,» 2011.
1]
- [3 Agencia de Sostenibilidad Energética, «Guía para calificación de consultores en Eficiencia
2] Energética,» 2011.
- [3 C. Karpuz, «Energy Efficiency of Drilling Operations,» 2017.
3]
- [3 «Revista Seguridad Minera,» [En línea]. Available:
4] <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/perforacion-minera-tipos-clases-de-maquinaria-y-ubicacion-de-taladros/>. [Último acceso: 2020].
- [3 M. Mansouri, «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Two-5\] AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a_fig6_296474523](https://www.researchgate.net/figure/Two-5] AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a_fig6_296474523). [Último acceso: 2020].
- [3 «Mining And Construction,» [En línea]. Available:
6] <https://miningandconstruction.com/mining/undergroundmining/efficiency-as-strong-as-iron-2607/>. [Último acceso: 2020].
- [3 The Warren Centre, «Zero Emission Copper Mine of the Future,» 2020.
7]
- [3 A. Aguirre, «Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía
8] en sociedad contractual minera El Abra,» Santiago de Chile, 2016.
- [3 «Minería Chilena: Fragmentación y tronadura - Optimización energética de operaciones
9] mineras,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/#>. [Último acceso: 2020].
- [4 H. González, «Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un
0] plan de producción en minería a cielo abierto,» Santiago de Chile, 2017.
- [4 J. Ortiz, «Apuntes de Curso de Explotación de Minas,» Santiago de Chile.
1]
- [4 Sandvik, «Rock Technology,» [En línea]. Available: [https://www.rocktechnology.sandvik/es-2\] la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/](https://www.rocktechnology.sandvik/es-2] la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/). [Último acceso: 2020].
- [4 INACAP, «Extracción Mina».
3]

- [4 Ferrostaal, «Ferrostaal,» [En línea]. Available: <https://www.ferrostaal.com/es/referencias-4-ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/>. [Último acceso: 2020].
- [4 Chang Ja Kim, «Diseño y evaluación técnico económica de un nuevo sistema de carguío y 5] transporte para la minería de hundimiento,» Santiago de Chile, 2009.
- [4 R. Castro, «Sistemas de Extracción Vertical,» Santiago de Chile.
6]
- [4 Jack de la Vergne, «Diccionario Técnico de Mineros y Petroleros,» 2012.
7]
- [4 T. Masquimillan, «Harneros,» [En línea]. Available: 8] <https://es.slideshare.net/tomasgmp/harneros>. [Último acceso: 2020].
- [4 «Minería Chilena,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-9-especifico-de-energia/#>. [Último acceso: 2020].
- [5 R. Sabbagh, «Theoretical and Experimental Investigation of Hydrocyclone Performance and the 0] Influence of Underflow Pumping Effect,» 2015.
- [5 Gaines, Energy and Materials Flow in the Copper Industry, 1980.
1]
- [5 Ministerio de Energía y Minas, «Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de 2] diagnóstico energético,» Perú.
- [5 Portal Minero, «Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras II,» Portal Minero Ediciones, Chile.
3]
- [5 G. Aravena, «Slide Share,» [En línea]. Available: 4] <https://es.slideshare.net/GabrielAravena/167573358-espesamientoyfiltrado>. [Último acceso: 2020].
- [5 Universidad de Chile, «Separación sólido - líquido,» Santiago de Chile.
5]
- [5 G. Riveros, «Fundamentos de Metalurgia Extractiva,» 2010.
6]
- [5 U.S. Department of Energy, «An assessment of energy requirements in proven and new copper 7] processes,» University of Utah, 1980.
- [5 G. Riveros, «Pirometalurgia,» Universidad de Chile, 2009.
8]
- [5 Comisión Chilena del Cobre, «Tecnología en fundiciones de cobre,» Chile, 2015.
9]

- [6 Metso, «Chancador Giratorio Primario,» [En línea]. Available: 0] <https://www.metso.com/es/productos/chancadores/chancadores-giratorios-primarios/chancador-giratorio-primario-superior/chancador-giratorio-primario-superior-60-110e/>. [Último acceso: 2020].
- [6 Rumbo Minero, «Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino,» [En 1] 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 2] línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/highservice-sensoflot-sensores-vanguardia-optimizar-la-flotacion-concentrados/>. [Último acceso: 2020].
- [6 Federación Minera, «Antofagasta Minerals definiría sus inversiones el 2017,» [En línea]. 3] Available: <http://www.federacionminera.cl/antofagasta-minerals-definiria-sus-inversiones-el-2017/>. [Último acceso: 2020].
- [6 Metso, «Horno térmico Grate Kiln Indurating Machine,» [En línea]. Available: 4] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1294367.html>. [Último acceso: 2020].
- [6 Britannica, «Roasting, smelting, and converting,» [En línea]. Available: 5] <https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-converting>. [Último acceso: 2020].
- [6 Consejo Minero, «Buenas Prácticas: Tostación en lecho fluidizado,» [En línea]. Available: 6] <https://i.ytimg.com/vi/8LCdB8sYqOg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [6 Minería Chilena, «Fundiciones de cobre en Chile,» [En línea]. Available: https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg. [Último acceso: 2020].
- [6 Nueva Minería y Energía, «Fundición de Concentrados de Chuquicamata lleva adelante cinco 8] 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].
- [6 Minería Chilena, «Innovación permite reducir generación de scrap durante la electrorrefinación,» 9] [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2014/05/earless-1-ok-620x403.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [7 Singh, «New trends in drilling and blasting technology,» *International Journal of Surface Mining, 0] Reclamation and Environment*, pp. 305-315, 2000.
- [7 Babaei Khorzoughi Mohammad y Hall Robert, «Processing of measurement while drilling data 1] for rock mass,» *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.

- [7 G. N. Moraga Hidalgo, «Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la 2] tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto,» Concepción, Chile, 2018.
- [7 Ingeopres, «Perforación y Voladuras,» España, 2011.
3]
- [7 J. Bernaola, J. Castilla y J. Herrera, «Perforación y voladura de rocas en minería,» Departamento 4] de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid, 2013.
- [7 J.B. Segui y M. Higgings, «Blast design using measurement while drilling parameters,» *Fragblast:* 5] *International Journal for Blasting and Fragmentation*, pp. 287-299, 2002.
- [7 Lei Ge, Long Quan, Xiaogang Zhang, Zhixin Dong y Jing Yang, «Power matching and energy 6] efficiency improvement of hydraulic excavator driven with speed and displacement variable power source,» *Chinese journal of mechanical engineering*, 2019.
- [7 Kwame Awuah-Offei, «Energy efficiency in mining: areview with emphasis on the role of 7] operators in loading and hauling operations,» USA, 2016.
- [7 G. Rojas, «Introducción de un LHD híbrido a la industria minera y sus posibilidades en el mercado 8] chileno,» Santiago de Chile, 2017.
- [7 R. Solorzano, «Caterpillar impacta con su excavadora híbrida,» 2016. [En línea]. Available: 9] <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>.
- [8 «Revista Maquinaria Pesada,» 2013. [En línea]. Available: 0] <http://revistamakinariapesada.com/caterpillar-entrego-su-primera-excavadora-hibrida-en-bauma-2013/>. [Último acceso: 2020].
- [8 E. Cornejo, «Sistema de optimización de transporte para la mediana minería,» Chile, 2013.
1]
- [8 A. Moradi Afrapoli y H. Askari-Nasab, «Mining fleet management systems: a review of models 2] and algorithms,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017.
- [8 Minería Chilena, «El caso de Trolley Assist,» 2012. [En línea]. Available: 3] <https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/>.
- [8 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-4\] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#](https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-4] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#).
- [8 Mikhailov, «A potencial application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat 5] mining,» 2019.

[8 Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi y Seyed Farhad Moosakazemi, 6] «Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry,» 2011.

[8 M. Nehring y P. Knights, «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing 7] and conveying, and truck/shovel systems,» 2017.

[8 J. Tonge, «The implications of improved conveyor technology on In-Pit Crusher Conveyor 8] Systems,» 2017.

[8 W. Loli Morales, «Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de 9] un pit crusher and conveyors,» Santiago de Chile, 2016.