



Reporte Energía en Minería Pirometalurgia

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Marzo 2021

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 Schröder/ 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	5
1.1	PROYECTO EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA.....	6
2	CONTEXTO Y ANTECEDENTES	6
2.1	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	7
3	ENERGÍA EN MINERÍA.....	8
4	ESTADÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN MINERÍA.....	8
5	PROCESOS MINEROS	11
5.1	CONMINUCIÓN. <i>LÍNEA PIROMETALÚRGICA</i>	11
5.1.1	<i>Chancado</i>	11
5.1.2	<i>Separación en Seco</i>	14
5.1.3	<i>Molienda</i>	16
5.1.4	<i>Clasificación en Húmedo</i>	19
5.1.5	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	20
5.1.6	<i>Proyectos Implementados</i>	47
5.2	CONCENTRACIÓN. <i>LÍNEA PIROMETALÚRGICA</i>	52
5.2.1	<i>Flotación</i>	52
5.2.2	<i>Espesamiento y Filtrado</i>	54
5.2.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	56
5.2.4	<i>Proyectos Implementados</i>	65
5.3	FUNDICIÓN. <i>LÍNEA PIROMETALÚRGICA</i>	67
5.3.1	<i>Secado</i>	68
5.3.2	<i>Tostación</i>	70
5.3.3	<i>Fusión de Concentrados</i>	71
5.3.4	<i>Conversión</i>	72
5.3.5	<i>Pirorrefinación</i>	74
5.3.6	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	75
5.3.7	<i>Proyectos Implementados</i>	85
5.4	ELECTRORREFINACIÓN. <i>LÍNEA PIROMETALÚRGICA</i>	86
5.4.1	<i>Descripción</i>	86
5.4.2	<i>Caracterización Energética</i>	87
5.4.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	87



5.4.4	<i>Proyectos Implementados</i>	99
6	BIBLIOGRAFÍA	100

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.

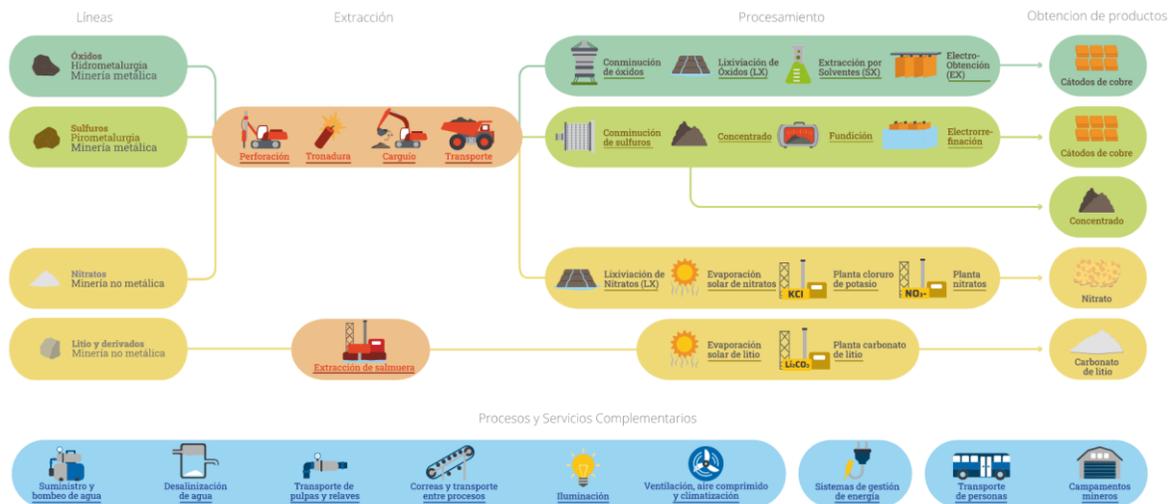


Ilustración 1. Mapa de procesos mineros. Fuente: GIZ.

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.

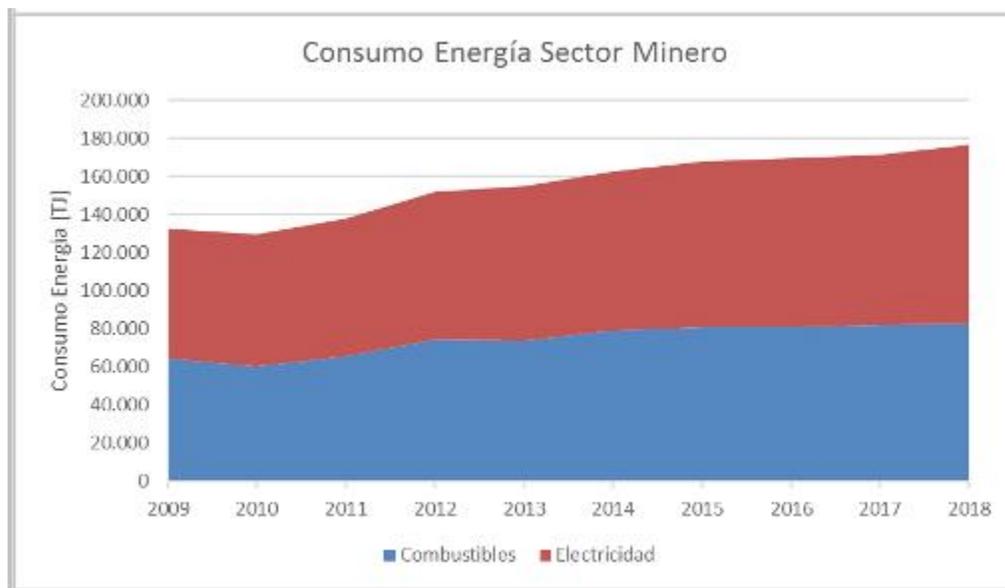


Ilustración 2. Consumo de energía en sector minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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.

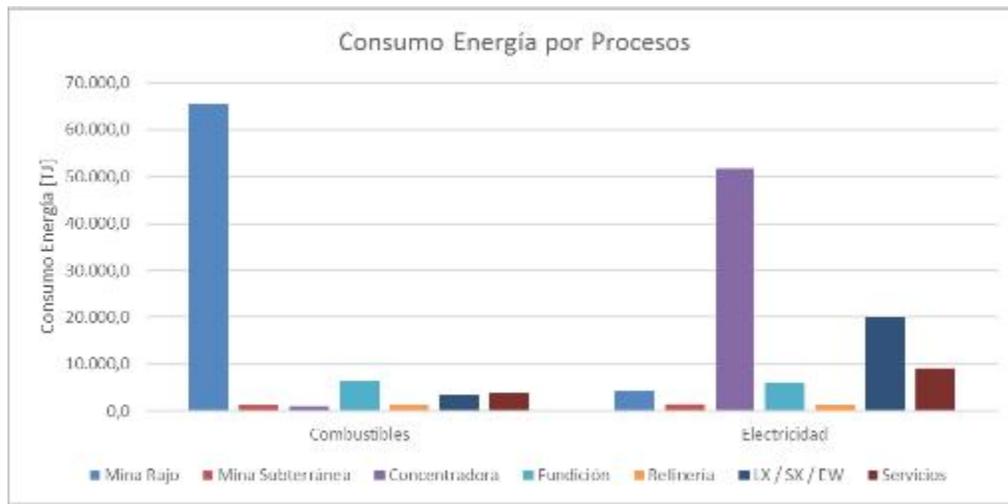


Ilustración 3. Consumo de energía por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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

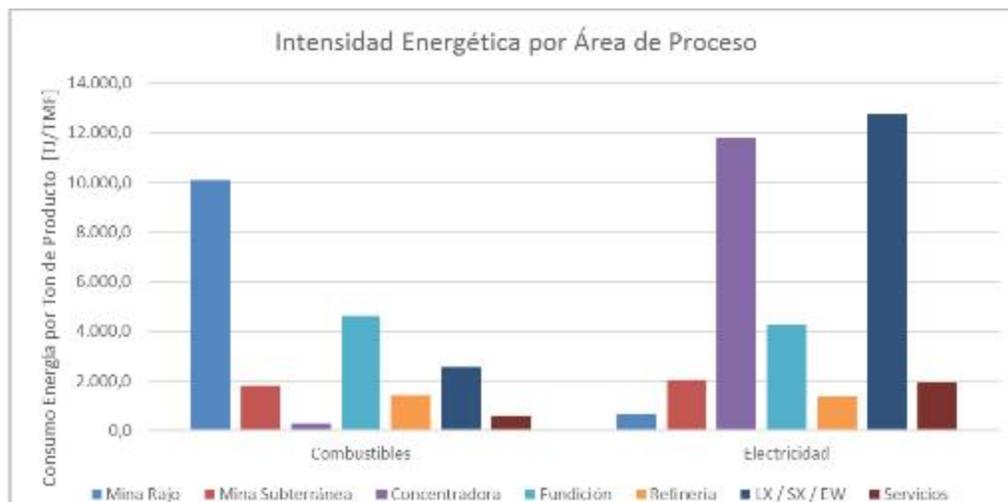


Ilustración 4. Consumo de energía en por tipo de combustibles y procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

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.

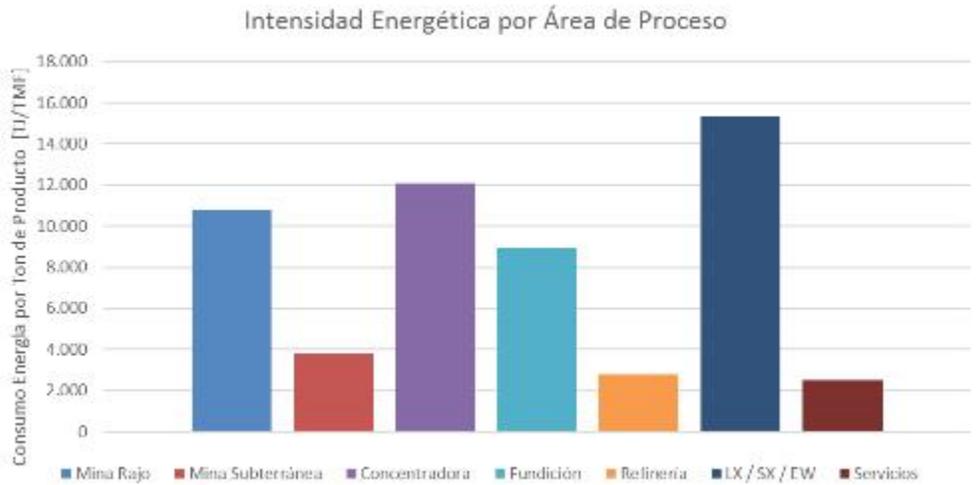


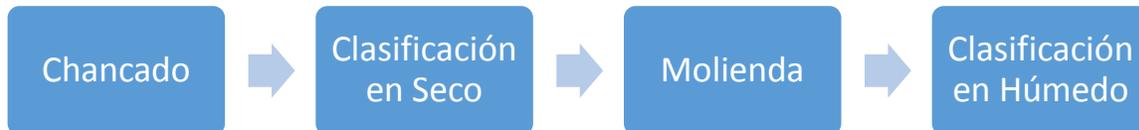
Ilustración 5. Intensidad energética por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

5 Procesos mineros

5.1 Conminución. Línea Pirometalúrgica

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 pirometalurgia, la conminución tiene principalmente cuatro subetapas que corresponde al chancado, la clasificación en seco mediante harneros, la molienda y la clasificación en húmedo mediante hidrociclones, tal como se indica en el esquema a continuación.



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 eléctricos 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 fundamentalmente los procesos de chancado y molienda. 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.

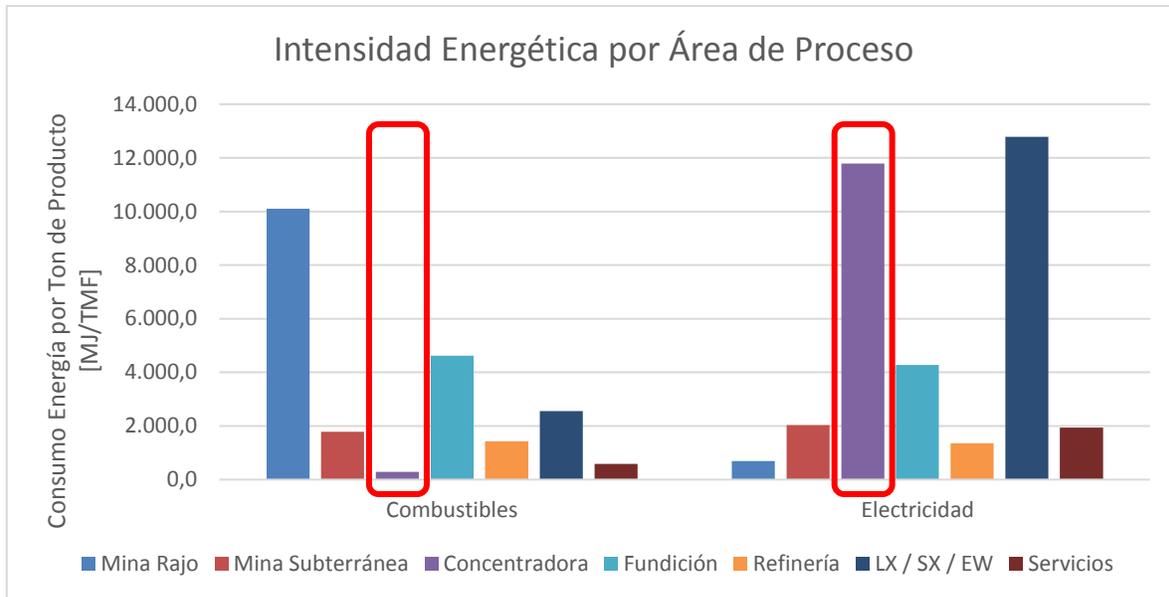


Ilustración 7. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso asociado a la Concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado. Fuente: en base a [5].

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 la 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].

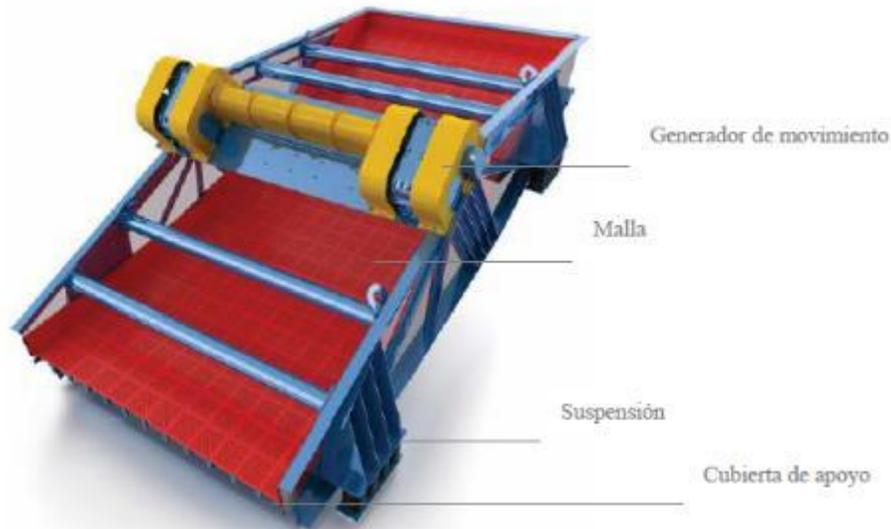


Ilustración 9. Harnero vibratorio tipo banana. Fuente: [11]



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

5.1.3 Molienda

5.1.3.1 Descripción

El proceso de molienda es la etapa siguiente al proceso de chancado, en la cual se continúa con el proceso de reducción del tamaño de las partículas que constituyen el mineral. En esta etapa, y a diferencia del chancado, se emplean cantidades suficientes de agua para formar un fluido con las condiciones requeridas, además de emplear reactivos para así iniciar el proceso de flotación. En efecto, los objetivos de la molienda son principalmente dos: liberar minerales individuales y dar paso al enriquecimiento de las especies de interés, y producir finos de fracciones de mineral incrementando la superficie específica, lo cual favorece el proceso físico-químico de la flotación.

Dentro del proceso de conminución, esta corresponde a la etapa de operación que consume la mayor parte de la energía de todo el proceso, por ello, es que en el último tiempo ha habido un fuerte desarrollo tecnológico que busca maximizar la eficiencia de estos equipos.



Ilustración 11. Planta de molienda. Fuente: [13]

5.1.3.2 Caracterización Energética

El proceso de molienda se caracteriza por tener un mayor consumo energético por tonelada de mineral respecto al proceso de chancado. Esto, se puede reflejar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Consumo de energía por sub etapas de chancado y molienda. 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
Molienda	Primaria	10 a 1 mm	3 a 6
	Secundaria	1 a 0,5 mm	4 a 10

El alto consumo energético asociado al proceso de molienda se puede atribuir a su reducida eficiencia energética, puesto que el 85% de la energía empleada en la conminución se disipa como calor, el 12% se atribuye a pérdidas mecánicas y sólo un 1% de la energía entregada se utiliza para reducir el tamaño del mineral [14].

Para apreciar el importante consumo energético asociado al proceso de molienda, a continuación, se muestra una ilustración que representa el consumo energético de los principales etapas y procesos mineros, dentro de los cuales se encuentra la etapa global de Concentración que contiene el proceso de molienda. En esta gráfica, 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.

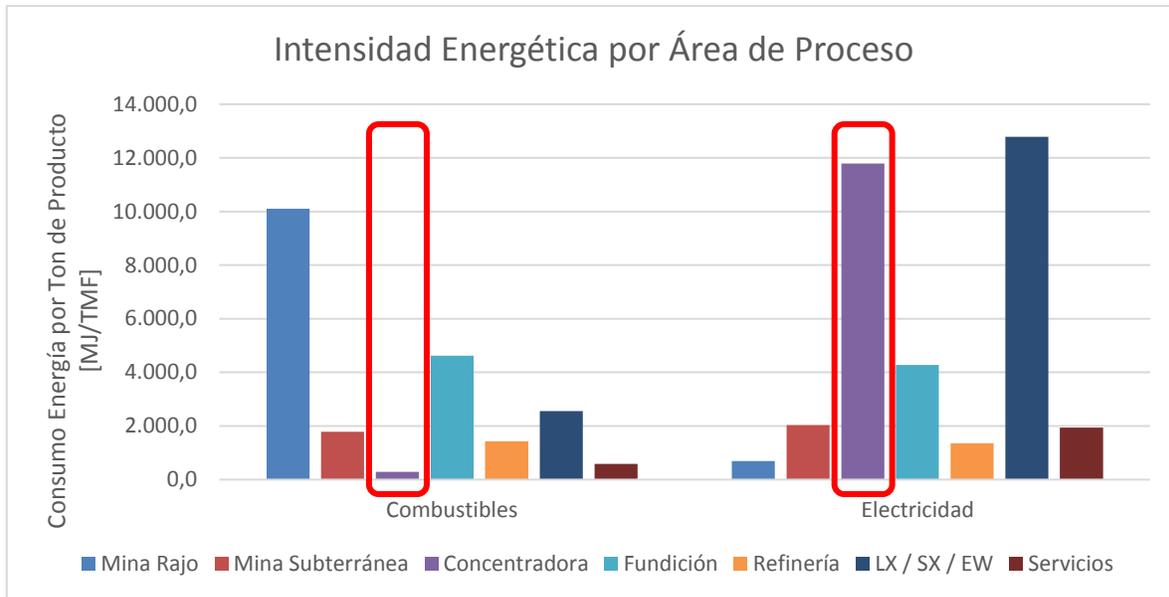


Ilustración 12. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso asociado a la Concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado. Fuente: en base a [5].

En cuanto a los equipos empleados para este proceso, estos se pueden resumir en equipos de molienda convencional en la cual se incluyen los molinos de barra y de bolas, y en molienda no convencional, donde se incluyen los molinos autógenos (AG) y semi-autógenos.

Con relación a los molinos de barra, estos corresponden a maquinarias cilíndricas de material metálico y de funcionamiento rotatorio que en su interior cuentan con barras de acero, que corresponden a los elementos de molienda. Mediante esta tecnología, es posible reducir el tamaño del mineral obteniendo un rango de tamaño de 3.300 a 300 micrones.

Los molinos de bolas son igualmente maquinarias rotatorias cilíndricas de material metálico cuyo elemento de molienda corresponde a un collar de bolas de acero. En términos de capacidad volumétrica, estos elementos de molienda pueden ocupar un 36% respecto al total. Por otra parte, estas maquinarias están diseñadas para moler minerales de hasta ¼ de pulgada para reducirlos a un tamaño entre 20 a 75 micrones.

Por otra parte, la molienda autógena tiene la particularidad de no utilizar ningún elemento de molienda externo, siendo el propio mineral el que actúa como tal. En general, los molinos autógenos son empleados para molienda de minerales en plantas de alta capacidad de tratamiento. En cuanto a los molinos semiautógenos (SAG), estos utilizan una carga mínima de bolas que ocupan un porcentaje entre el 6% y 15% de su capacidad, y los cuales corresponden a molinos de gran capacidad que se utilizan principalmente en las plantas de procesamiento de oro, cobre y platino.

Los molinos de bolas son los más ineficientes en términos de consumo de energía, sin embargo, su uso es amplio en la industria integrándolos con molinos de barras o SAG que son más eficientes.

La siguiente figura muestra la distribución de costos de operación en diferentes tecnologías de molienda en donde se aprecia con claridad que la energía es el costo primario en todos los casos, seguido por el recambio de los medios de molienda (bolas y/o barras) y de los revestimientos.

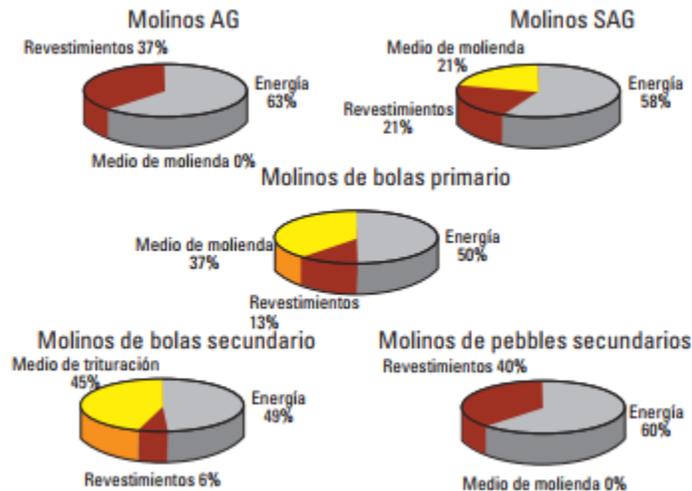


Ilustración 13. Distribución de costos asociados a tecnologías de molineras. Fuente: [7]

5.1.4 Clasificación en Húmedo

5.1.4.1 Descripción

La clasificación en húmedo es el proceso de separación de partículas por tamaño en dos o más productos según sea su comportamiento en aire o en agua. Este método de separación es requerido para clasificar partículas más finas que 1 mm en donde un harnero deja de ser funcional. El método de clasificación en húmedo más usual corresponde a la clasificación mediante hidrociclones. Estos, corresponden a maquinarias que permiten separar las partículas livianas de las de mayor peso mediante el efecto centrífugo provocado por el giro de la pulpa alimentada con presión en la parte lateral superior del ciclón cónico. Las partículas de mayor peso próximas a la pared externa se dirigen a la zona inferior; por otra parte, las partículas de menor masa próximas al centro se dirigen hacia el rebase del ciclo puesto en la parte superior.

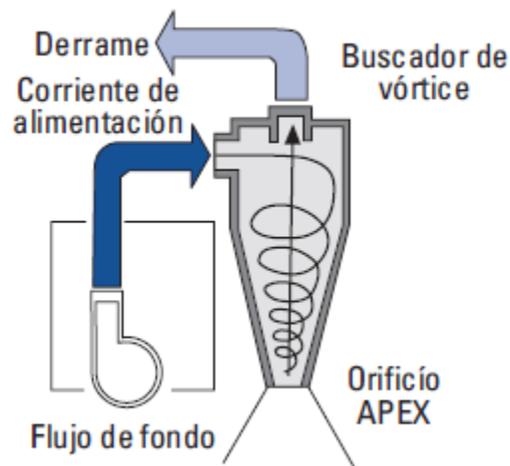


Figura 1. Ejemplo de Hidrociclón usado en minería y diagrama de funcionamiento. Fuente: [7]

5.1.4.2 Caracterización Energética

En conjunto con el uso de los molinos, también debe considerarse importantes consumos de energía en los hidrociclones requeridos para la selección de tamaños del mineral en forma de pulpa. Los hidrociclones son en esencia ineficientes pero requeridos, y por lo tanto deben dimensionarse adecuadamente en base a herramientas computacionales previstas por los fabricantes. El consumo de energía en estos casos viene dado por el uso de bombas de impulsión de pulpa para su alimentación que generalmente corresponden a bombas de tipo centrífugas, cuyo consumo energético puede ir desde los 10^{-3} kWh/m³ a aproximadamente 2 kWh/m³ [15].

En la siguiente ilustración, se presenta el consumo energético del asociado a la etapa global de Concentración, la cual considera como parte de su línea productiva al proceso de clasificación en húmedo. 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.

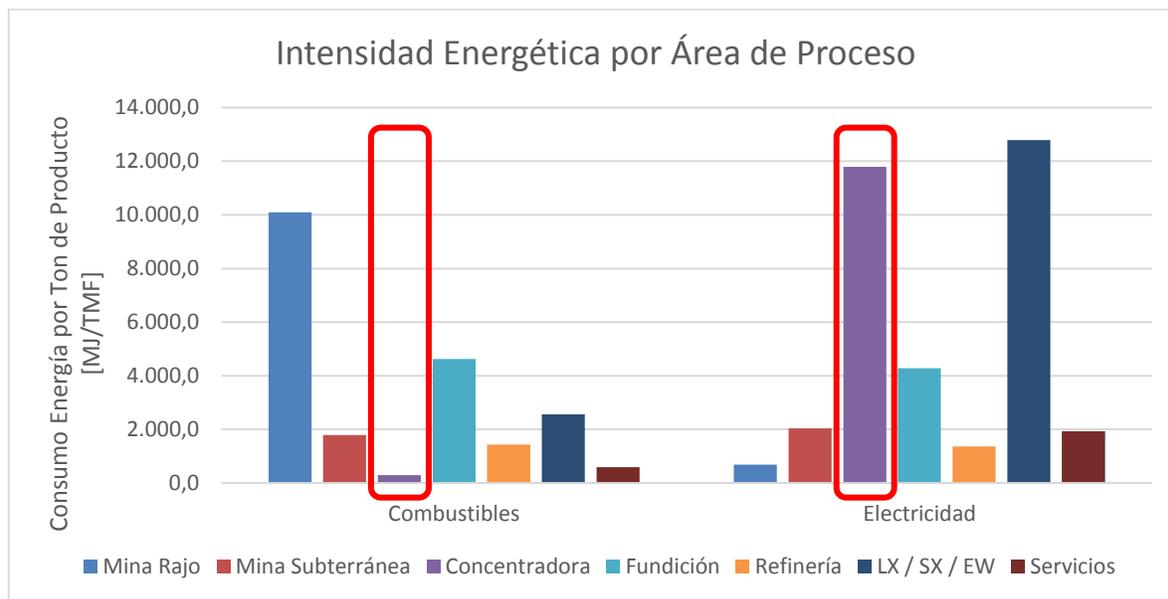


Ilustración 14. Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino TMF. Para el caso del proceso asociado a la Concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado. Fuente: en base a [5].

5.1.5 Medidas de Eficiencia Energética

5.1.5.1 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 3. 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
Feldespato	10,80	Molibdeno	12,80

Sólidos	Wi [kWh/ton corta]	Sólidos	Wi [kWh/ton corta]
Ferro-cromo	7,64	Pedernal	26,16
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.

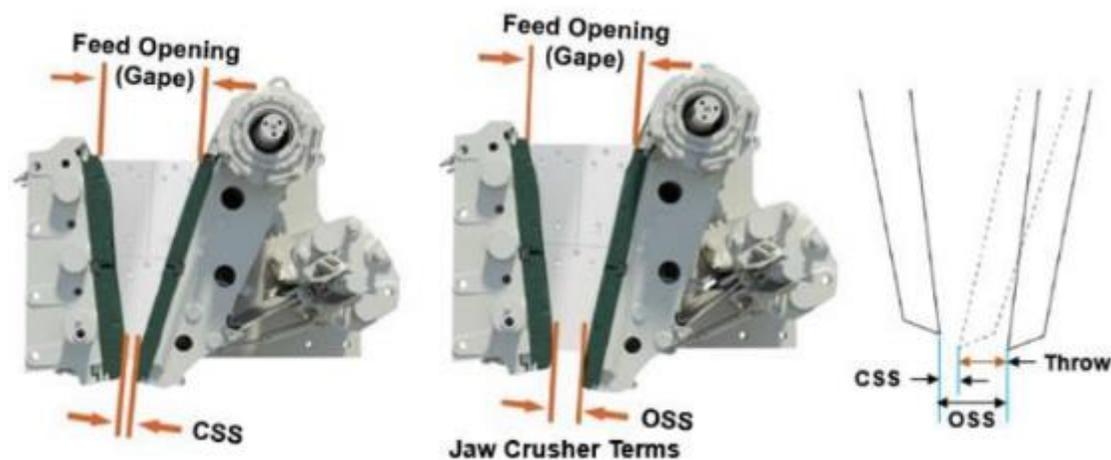
Por lo general, para el chancado primario a nivel estacionario, ya sea en superficie o subterráneo, se tienen como opciones los chancadores giratorios primarios, de mandíbula y de impacto. Para minerales blandos, la primera opción es frecuentemente un chancador de impacto horizontal, si es que la capacidad 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].

5.1.5.2 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 apertura 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 [16].

5.1.5.3 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 [16]:

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

5.1.5.4 Recomendaciones generales de lubricación de chancadores. M5.4

Medida operacional

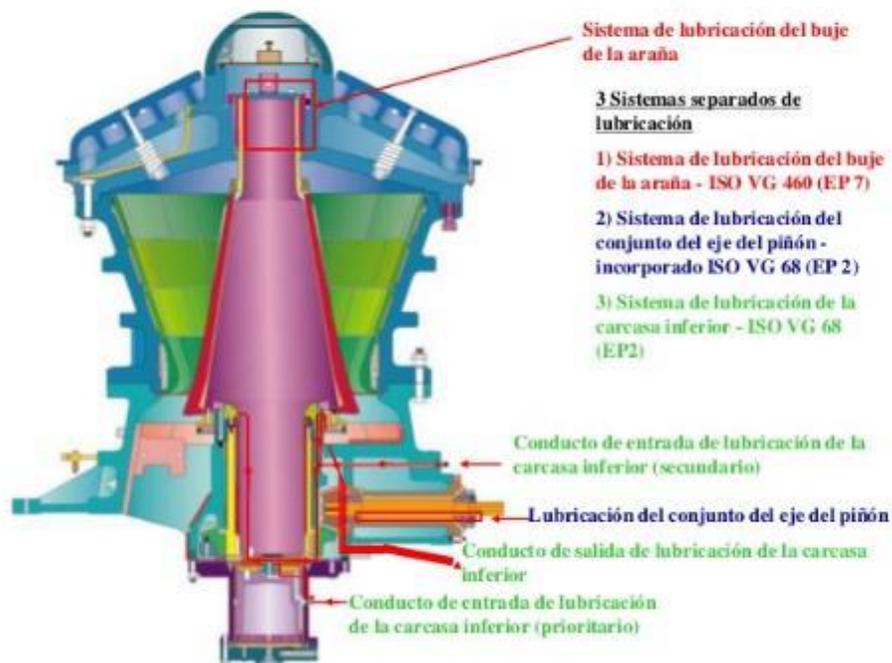
Medida eléctrica

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>

5.1.5.5 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% [17].

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

5.1.5.6 Implementación de partidor 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).

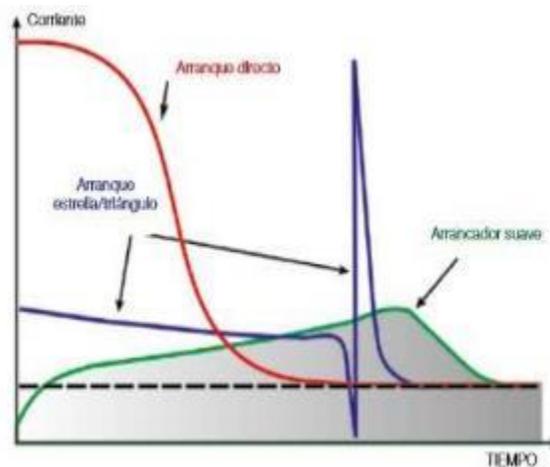


Figura: Gráfico Corriente vs tiempo según tipos de arranque

5.1.5.7 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

5.1.5.8 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

5.1.5.9 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) [18]. 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 [19].

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 [20]:

- 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 [21]:

- 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 [21]:

- 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

5.1.5.10 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 [22].



Fuente: Ingeniería y Construcciones Salas Hermanos Ltda.

5.1.5.11 Selección de molinos de rodillos de alta presión (HPGR). M9.1

Medida de diseño

Medida eléctrica

Los molinos de rodillos de alta presión (HPGR) son maquinarias en las cuales ingresa un flujo de partículas de mineral pre-triturado grueso (aproximadamente 60 mm de tamaño máximo), y que es finamente molido entre dos rodillos giratorios. En este proceso, los rodillos se presionan entre sí mediante un sistema hidráulico, alcanzando así una presión elevada en la zona de molienda que se sitúa entre los rodillos, acercándose y superando la resistencia a la compresión de la roca. A diferencia de la trituración de los rodillos convencionales, la tecnología HPGR logra una reducción de tamaño como resultado de la compresión interpartícula dentro del lecho de partículas, y no por la trituración por contacto de partículas gruesas entre las superficies de los rodillos (F van der Meer, 2010).

Los componentes principales de un equipo HPGR corresponden a 2 rodillos, un sistema hidráulico, revestimientos, un chute de alimentación de compuerta variable y un sistema de lubricación. Con relación a los rodillos, la característica que define su geometría corresponde a la razón largo/diámetro. Dependiendo de esta razón, se observan distintas características en la operación y diseño de los equipos: en los rodillos de razones $L/D < 1$ se ejercen torques de altas magnitudes, lo que se traduce en mayor potencia requerida; mientras que para rodillos de razones $L/D > 1$, se deben utilizar rodillos que posean un sistema de corrección del desalineamiento del rodillo móvil.

En cuanto a los revestimientos del HPGR, estos dependerán del diseño de los rodillos, así como de la superficie a utilizar. El diseño de los rodillos a escoger depende de la inversión a realizar y de las políticas de mantención adoptadas por la compañía. Los rodillos sólidos pueden ser forjados o fundidos, empleándose principalmente en la industria del cemento. Los rodillos compuestos por llantas adosadas en un eje han sido utilizados con éxito en la industria de minerales metálicos y no metálicos. Estos, se caracterizan por poseer bajas tasas de desgaste y bajos costos de operación, además de no restringir la presión de operación del equipo. Por último, el diseño por segmentos no es aplicable en operaciones que requieren alta presión de molienda, caracterizándose por otro lado en poseer altos costos de operación y altas tasas de desgaste.

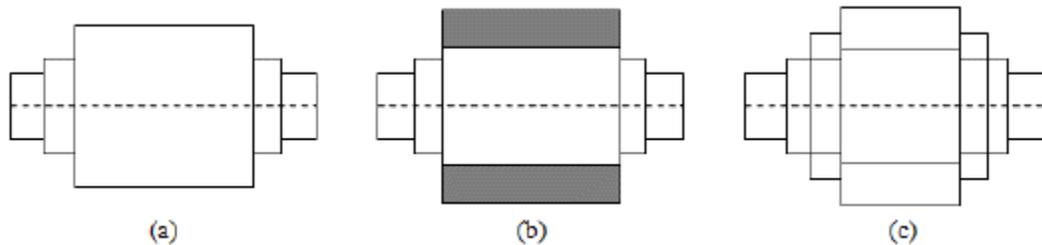


Figura. Diseño de rodillos empleados en tecnología HPGR: a) Rodillos sólidos, b) Llantas sobre un eje, c) Segmentos. Fuente: (Torres, 2010).

La superficie de los revestimientos dependerá de las características del mineral a tratar. Los patrones en la superficie determinan los ángulos de compresión, y son los responsables de generar el roce necesario para inducir el movimiento del lecho de partículas entre los rodillos, es decir, la capacidad de tratamiento depende de la superficie de rodillos a emplear.

Con relación al chute de alimentación del HPGR, este se compone de material cerámico con el objeto de maximizar su vida útil y evitar la adhesión de partículas de mayor humedad en las paredes del mismo. Con el propósito de asegurar la formación de una capa de partículas, los chutes poseen una compuerta variable que permite el control del tonelaje sobre el lecho de mineral (Torres, 2010).

Por último, en cuanto al uso de la tecnología HPGR, se espera que genere un ahorro de energía que puede variar entre un 10-20%, esto al compararlo con un molino SAG (CEEC The Future, s.f.).

5.1.5.12 Selección y diseño de revestimientos en molinos. M9.2

Medida operacional

Medida eléctrica

Las dramáticas deficiencias de los diseños de los revestimientos de los molinos, especialmente de los grandes molinos SAG, han puesto en relieve la importancia de la correcta selección de aquellos. El diseño deficiente del revestimiento tiene un efecto perjudicial en el rendimiento de la molienda

y en la vida útil del mismo. Esto da como resultado una pérdida de ingresos y un aumento de costos operacionales, ya que la reducción de la eficiencia de la molienda puede resultar en un uso excesivo de energía y en una menor recuperación de los minerales valiosos.

Hay varias herramientas disponibles para guiar el diseño de los revestimientos a fin de ayudar a optimizar el perfil para adaptarse a una aplicación particular. Los beneficios pueden ser sustanciales, con cambios drásticos en la vida útil, el tiempo de inactividad y el costo del revestimiento. Al mismo tiempo, la productividad de los molinos puede mantenerse en torno al nivel óptimo si se comprende la interacción entre el diseño del revestimiento y el funcionamiento del molino.

A continuación, se dan algunas directrices para el correcto diseño de los revestimientos (Powell, Radziszewski, & Cleary, 2006):

1. Considerar el rendimiento esperado, vida útil, intervalos y extensión del tiempo de inactividad, variabilidad en el mineral, llenado del molino, velocidad del molino, carga de bolas, etc.
2. Es prudente discutir los posibles diseños de revestimientos con los equipos de revestimiento y mantenimiento. Sus aportaciones y su aceptación pueden marcar una diferencia significativa en el rendimiento de un revestimiento.
3. Los diseños de los revestimientos deben ser adaptados a los materiales con los que se van a fabricar. Por ejemplo, un acero al cromo-molibdeno con alto contenido en carbono tiene requisitos de diseño diferentes a los de un hierro blanco al cromo-molibdeno.
4. Se requiere un cálculo adecuado de la altura de desgaste del lifter en relación con el espesor de la placa del revestimiento. Esta relación de desgaste debe ser conocida o estimada para evitar el fallo prematuro del lifter de la placa de soporte.
5. Algunos proveedores están a favor de que el diseño del patrón de perforación del molino sea flexible para permitir que el espaciamiento de las hileras varíe en un rango limitado, de modo que se pueda seleccionar el espaciamiento óptimo de aquellas.
6. Se recomienda trabajar con un diseño que facilite la remoción de los revestimientos gastados.
7. En general, es prudente basar los diseños y materiales en las tendencias de trabajo actuales. Cualquier cambio debe evaluarse adecuadamente a la luz de la experiencia actual con los diseños y materiales de revestimientos operativos.

En cuanto a los beneficios potenciales asociados a una correcta adaptación de los revestimientos, estos se pueden resumir en los siguientes (Powell, Radziszewski, & Cleary, 2006):

1. SAG/AG maximizan la altura de caída de los fragmentos, maximizando el impacto.
2. Aseguran una acción en cascada para los molinos de remolienda.
3. Evita el impacto en la carcasa del molino.
4. Previene roturas de bolas evitando impactos directos sobre la carcasa.
5. Maximiza el rendimiento del molino con el espacio y la altura correctos de las barras lifters, un diseño esencial en el diseño del revestimiento.
6. Equilibra la vida útil del revestimiento y el rendimiento del molino, manteniendo al mismo tiempo el movimiento de carga correcto de las bolas para la molienda.



Figura. Revestimiento de molino. Fuente: Elecmetal.

5.1.5.13 Implementación de un sistema de control en circuito de molienda. M9.3

Medida operacional

Medida eléctrica y de control

Actualmente existe una gama de sistemas de control aplicado a la planta de molienda, los cuales pueden ser sistemas expertos, sistemas basados en un control predictivo de modelos (MPC), control de lógica difusa, controladores multivariantes, sistemas basados en control PID, control adaptativo, control basado en redes neuronales, programación lineal, control de procesos estadísticos, control de compensación de tiempos muertos y control de restricciones. Dentro de esta gama, los principales métodos de control corresponden al sistema experto y al sistema MPC cuyas diferencias es de relevancia indicar:

1. Un sistema experto utiliza un modelo de los operadores; en cambio el MPC utiliza un modelo matemático del sistema.
2. Un sistema experto es algebraico y está basado en reglas; en cambio el sistema MPC se basa en algoritmos y es predictivo.

En cuanto a los programas comerciales que permiten ejecutar un método de control al proceso de molienda/clasificación, estos pueden resumirse en los siguientes: Emerson Delta V MPC, ABB Linkman Expert Optimizer, Invensys Connoisseur, Honeywell Profit Suite, Gensym G2, Prediktor, Metso Adaptive Predictive Model, y Metso OCS.

La implementación de un sistema de control trae consigo diversos beneficios, tales como el aumento de rendimiento en lo que respecta producción de mineral, lo cual se puede reflejar en la siguiente gráfica, de la cual se observa un aumento del 2% al 11%. Asimismo, un sistema de control trae consigo una reducción de la variabilidad del rendimiento, una reducción de la variabilidad de carga del molino, una reducción del consumo energético, un tamaño de partícula objetivo alcanzado y un aumento en la recuperación (Bouffard, 2015).

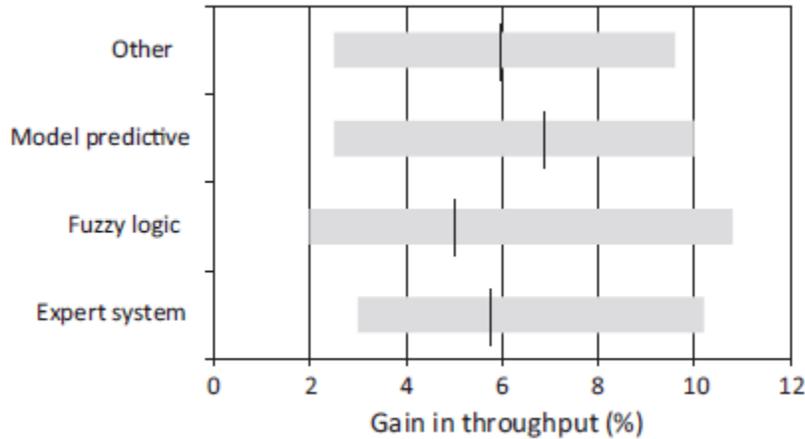


Figura. Rango de aumento de rendimiento logrado con diferentes sistemas de control en el circuito de molienda/clasificación. Fuente: (Bouffard, 2015).



Figura. Ejemplo sistema de control. Fuente: Oliver + Batlle.

5.1.5.14 Empleo de chancador Sizer en molienda. M9.4

Medida de diseño

Medida eléctrica

Una alternativa de las tecnologías tradicionales para fragmentar los minerales corresponde a los equipos trituradores denominados sizers. Inicialmente, fueron empleados en roca con dureza baja a media, no obstante, con los avances tecnológicos, estos equipos pueden trabajar con rocas muy abrasivas, viscosas y de gran dureza, con la misma eficiencia e independiente del contenido de humedad.

La operación de estos equipos se basa en dos rodillos dentados, girando en sentido opuesto que generan una fuerza de compresión y cizalle. En la mayoría de las rocas la razón de resistencia a la compresión con respecto a la de cizalle es alta, generalmente del orden de 10:1.

Los equipos sizer son equipos de conminución no convencional, siendo capaces de procesar material de hasta 3 m³, con capacidades que superan las 12.000 t/hora. Este chancador es capaz de procesar material con alto nivel de humedad, pegajoso, o roca seca y dura, o bien, una combinación de los dos.

La principal característica es su menor peso y tamaño respecto a los chancadores tradicionales, lo que lo convierte en una maquinaria ideal para operaciones subterráneas. Requiere menor fundación, un sistema eléctrico simple, y no requiere grandes excavaciones. Por otra parte, el material puede ser alimentado en forma continua o discontinua.

La disposición de los dientes en el rodillo permite que los trozos de menor tamaño caigan directamente a través del equipo, lo cual resulta en una mayor capacidad de producción a muy baja velocidad de rotación, generando menor desgaste, mayor ahorro de energía, mayor control del tamaño de descarga en las tres dimensiones y gran reducción de finos en el producto (Fuenzalida, 2010).



Figura. Chancador sizer. Fuente: Revista Minería Chilena.

5.1.5.15 Correcto funcionamiento y operación de hidrociclones. M9.5

Medida operacional

Medida eléctrica y de control

A diferencia de lo que ocurre con la mayoría de los equipos, un hidrociclón puede operar a pesar de que sus revestimientos estén desgastados, defectuosos, e incluso cuando la configuración sea incorrecta. En base a esta cualidad, es que se tiende a realizar mantenencias y/o reparaciones únicamente cuando dichos equipos fallan, subestimando las consecuencias que trae consigo la defectuosa operación que pueden estar realizando equipos que se encuentran en condiciones poco óptimas. Es importante apreciar que la clasificación en húmedo es un subproceso que forma parte de la molienda, la cual corresponde a uno de los procesos con mayor intensidad energética, por lo tanto, es de relevancia llevar a cabo una clasificación efectiva del tamaño de partículas, con el fin de no incidir negativamente en el rendimiento de las etapas posteriores a esta.

En base a lo anterior, es que se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo que permita contribuir a mejorar el rendimiento de los sistemas de clasificación. Es importante recalcar que cualquier negligencia en el mantenimiento preventivo provoca déficits mecánicos (revestimientos desgastados o destruidos, agujeros en los detectores de vórtices o en las carcasas de los ciclones, etc.), lo que se traduce inmediatamente en un exceso de partículas mal distribuidas, lo cual disminuye el rendimiento del proceso de clasificación y por consiguiente aumenta los recursos energéticos requeridos para llevar a cabo dicha operación (Roman van Ommen, 2011).

Considerando lo anterior, se recomienda implementar las siguientes medidas (Roman van Ommen, 2011):

- Comprender los principios de funcionamiento y los factores que inciden en el rendimiento de la clasificación (tamaño de partícula, velocidad de entrada, densidad sólido/líquido, viscosidad, entre otros).
- No hacer funcionar los hidrociclones a un derrame o densidad de alimentación más alta de lo necesario.
- Hacer funcionar los hidrociclones siempre con la mayor densidad de descarga posible.
- Ajustar el número de ciclones en función del flujo de corriente.
- Operar los ciclones de forma simétrica dentro del manifold.
- Llevar un registro de las horas de funcionamiento y del índice de desgaste de cada hidrociclón.
- Realizar mantenimiento una vez que se exceda la tolerancia establecida.
- Trabajar en estrecha colaboración con el fabricante del equipo para obtener experiencia y validar posibles cambios.

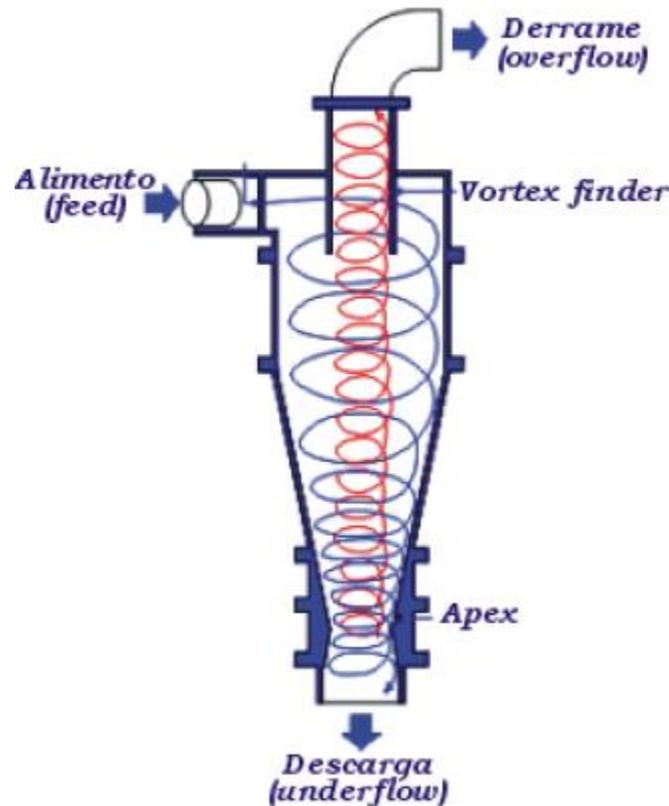


Figura. Visualización de alimentación, descarga y derrame. Fuente: (Cuba & Ariel, 2018)

5.1.5.16 Medición de tamaño de partículas en tiempo real en circuito de molienda. M9.6

Medida operacional

Medida eléctrica y de control

Recientemente se ha desarrollado el software comercial Particle Size Tracking (PST) (Rastreo de Tamaño de Partícula), una tecnología innovadora para medir el tamaño de partícula en línea y en tiempo real, capaz de medir el tamaño de partícula en el overflow de cada hidrociclón. Esta tecnología ya ha sido probada en varias instalaciones comerciales y ha demostrado casi un 100% de disponibilidad con un requerimiento mínimo de mantención, en donde además se ha comprobado un aumento del 2% en la producción neta de metal.

La implementación de esta tecnología se centra en una sonda sensor que se inserta en la tubería de overflow de cada hidrociclón a través de un orificio de 2 pulgadas. Las partículas en la pulpa impactan la superficie de la sonda generando ondas que viajan al interior de ella. Un sensor convierte estas ondas en señales eléctricas, las que, mediante un procedimiento patentado, permiten medir el tamaño de partícula que se genera cada cuatro segundos. Cabe señalar que, debido a la ubicación del sensor aguas abajo del hidrociclón y a la presencia de un núcleo de aire en ese punto, el sensor no produce ningún cambio en la contrapresión de dicho equipo, ni tampoco afecta su funcionamiento.

La implementación del sistema de rastreo de tamaño de partícula PST incluye una sonda de medición con sus componentes electrónicos, y una caja de interconexión que consolida las señales

procesadas provenientes de los sensores individuales y las envía a un computador que se ubica generalmente en la sala de control. El procesamiento final se realiza en ese computador y la información resultante sobre el tamaño de partícula es transferida al sistema de la planta por medio de un servidor integrado.

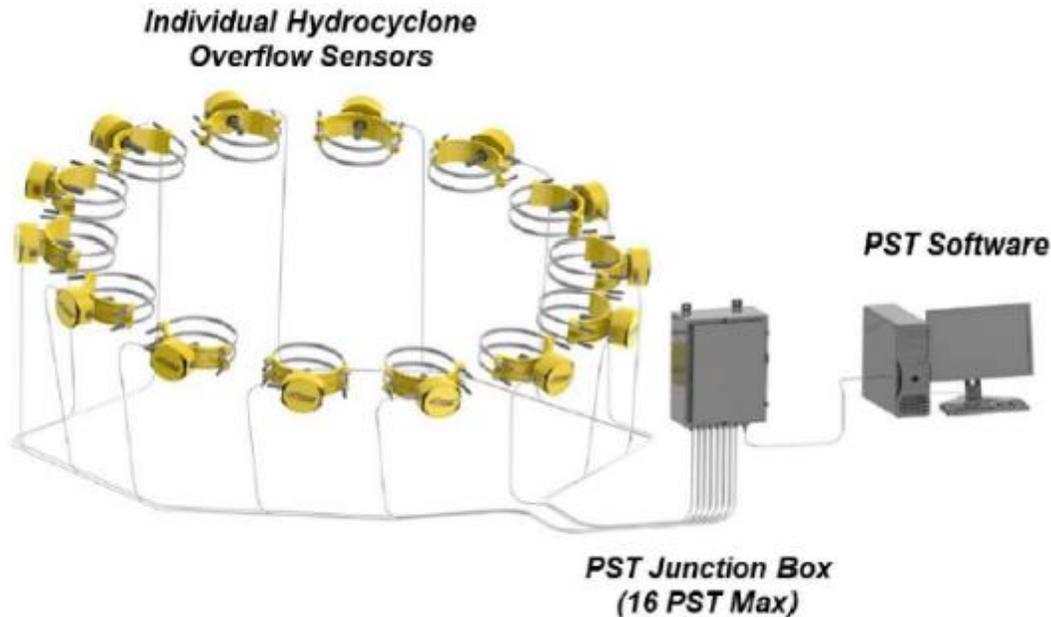


Figura. Esquema de monitorización de hidrociclones

Contar con una medición confiable del tamaño del producto es esencial para el control operacional de los sistemas de molienda/clasificación, particularmente en los casos donde la siguiente etapa del proceso es la concentración por flotación selectiva, por esta razón, es que se recomienda implementar un sistema de medición de tamaño de partículas como el recientemente descrito (Maron, O'Keefe, & Sepulveda, 2017).

5.1.5.17 Verificación de eficiencia de subetapas de chancado y molienda. M9.7

Medida operacional

Medida eléctrica

Se recomienda la verificación sistemática del consumo de energía de las plantas de chancado y molienda en función de las toneladas procesadas de material y que esta revisión se realice para cada sub-etapa.

Para ello es primordial contar con medidores de energía por subetapa de chancado y molienda o idealmente por cada unidad de chancado o molino de modo de poder cuantificar el consumo por tonelada de cada unidad. Se deberá verificar que el consumo específico esté dentro 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
Molienda	Primaria	10 a 1 mm	3 a 6
	Secundaria	1 a 0,5 mm	4 a 10

En el caso de la molienda, también existen software de simulación computacionales y/o planillas de cálculo detalladas como es el caso Moly-Cop Tools ([link](#)) diseñadas para caracterizar la eficiencia operacional de un determinado circuito de molienda a base de modelos validados en aplicaciones reales. Con este tipo de herramientas es posible calcular la potencia eléctrica requerida por un molino y posteriormente validarlo con mediciones reales efectuadas.

En caso de observarse consumos de energía superiores a los indicados en la tabla o en el software de cálculo se deberá realizar una adecuada mantención de las unidades verificando el desgaste de las piezas, ya que cuando se excede el límite permisible de desgaste, la eficiencia de los chancadores y molinos 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. Es muy relevante que la eficiencia energética en las etapas de chancado sea superior a la de molienda, en caso contrario también deberán realizarse las labores de mantenimiento que aseguren una eficiencia siempre mayor a las etapas de molienda.



Figura. Proceso de Chancado. Fuente: Nueva Minería Chilena

5.1.5.18 Incorporación de Gearless Mill Drive (GMD). M9.8

Medida operacional

Medida eléctrica

El proceso de molienda de minerales de baja ley necesita cada vez molinos de mayores capacidades y de la más alta confiabilidad. Hay una orientación al gigantismo en los equipos, lo que permite procesar mayores tonelajes y a la vez, por economías de escala, reduce fuertemente los costos de instalación y operación. La tecnología GMD elimina el roce mecánico convencional de los elementos estándares en los molinos, como los piñones, cajas de engranajes y acoplamientos, lo anterior repercute de manera importante en el desgaste y especialmente en la eficiencia energética del proceso de molienda.

Los accionamientos GMD controlan la velocidad de operación de los molinos, permitiendo partidas suaves y eliminando el estrés mecánico. El equipo provee el máximo control en el proceso de molienda, alcanzando los requerimientos de los usuarios en materia de procesos de alta eficiencia y flexibilidad.

Los sistemas GMD se componen por lo general de un set de transformadores, motores de anillo y una sala eléctrica para su funcionamiento. Los motores de anillo contemplan polos sin engranajes o también llamados sincrónicos o envolventes y se instalan directamente en la brida del polo de la carcasa del molino, convirtiendo el cuerpo del molino en el rotor para finalmente el estator envolver al molino. Este motor es alimentado por un cicloconvertidor que tiene una frecuencia de salida nominal de alrededor 5 Hz para el variador GMD. Un pequeño convertidor de excitación suministra la excitación de los polos a través de los anillos colectores del motor sin engranajes.

Los molinos son por lejos el mayor consumidor de energía en una planta concentradora. El sofisticado sistema de bobinado de una sola vuelta garantiza que se minimicen las pérdidas del bobinado del estator. Además, el aumento de la temperatura del motor es relativamente bajo, lo que resulta en una baja expansión térmica y una menor resistencia de las bobinas de cobre, lo que se traduce en menores pérdidas y un aumento de la eficiencia. Se logra una mayor reducción de pérdidas minimizando el número de semiconductores en el cicloconvertidor.

Se ha demostrado que el uso de GMD para alimentar molinos semiautógenos (SAG), de bolas y autógenos (AG) proporciona un rendimiento, confiabilidad y disponibilidad mejorados en las plantas de procesamiento. En términos energéticos, la tecnología permite alcanzar ahorros de hasta un 3% en comparación con las soluciones convencionales, reduciendo las emisiones de carbono de la planta y generando importantes reducciones de costos.

La tecnología GMD se debiera considerar como estándar en plantas con requerimientos de potencia sobre los 18 MW o incluso para potencias mayores a 12 MW.

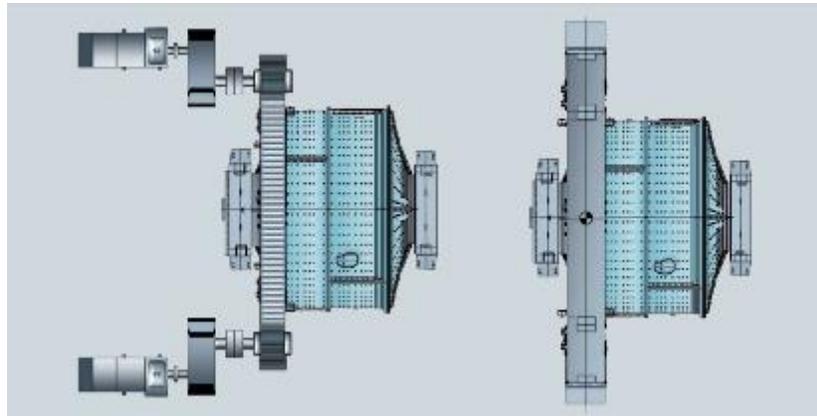


Figura. Molino SAG con accionamiento tradicional (izq) y con GMD (der). Fuente: Siemens

A modo de resumen, los beneficios que presenta la tecnología GMD son los siguientes:

- Reducción del mantenimiento y minimización del riesgo de inactividad mediante la eliminación de componentes eléctricos, acoplamientos, cojinetes y cajas de engranajes
- Mayor productividad de la planta debido a una mayor disponibilidad
- Hasta un 3 % más de eficiencia energética: se puede lograr con la tecnología de transmisión sin engranajes (a potencia y velocidad nominales)
- Mayor potencia disponible en el componente accionado, superando los límites mecánicos de los sistemas con reductores
- Menos repuestos resultando en menores inventarios
- Huella más pequeña del tren de transmisión completo
- Menores gastos operativos
- Se evitan los trenes de potencia de engranajes abiertos críticos (Dugalic y Tischler, 2009)
- Diseño robusto (Dugalic & Tischler, 2009)

Para mayor información sobre la tecnología:

https://library.e.abb.com/public/46de79b27d634a56820de89839eb7eea/Gearless_mill_drives_LR_web.pdf

<https://library.e.abb.com/public/20400e6212644d88b00b517c908dcb9c/EXTRACTING%20POTENTIAL%20WITH%20GMD%20AND%20GCD%20-%20Global%20Mining%20Review%20-%20May%20June%202020.pdf>

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public/1526458191.43bdd1aa8285cab50dcc8127a6e141b14e6dcc51.availability-and-reliability-gearless-drives.pdf>

5.1.5.19 Optimización ángulo de levante de lifters molino SAG. M9.9

Medida operacional

Medida eléctrica

La optimización del ángulo de ataque en los lifters es una de las variables más influyentes en el consumo de potencia de molinos. Debido a esto, es factible optimizar el ángulo de ataque esperando una disminución de 3 a 4% del consumo eléctrico. Para ello, se instalan sistemas tipo Pull-

lifters, que modifican el ángulo, para asegurar que la pulpa de la molienda se desplace con mayor facilidad hacia el tromel, generando mayor rapidez en la evacuación evitando con ello que se acumule pulpa dentro del molino, y, por lo tanto, reduciendo energía en el proceso.

En la figura 1 se observa el ángulo de ataque previamente señalado, éste juega un importante rol en el proceso de molienda en los molinos SAG, ya que el lifter se encarga de levantar el material, por lo que el ángulo -y geometría- que presente este elemento influirá en cómo interactúa el material a procesar con el revestimiento interno del molino.

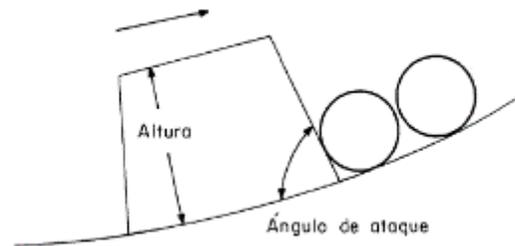


Figura. Identificación del ángulo de ataque en un molino de bolas. Fuente: Valderrama y Magne

En consecuencia, se ha demostrado que la geometría del lifter, y, por tanto, su ángulo de ataque, implica distintos consumos de energía. Esto permite encontrar un ángulo óptimo para disminuir el consumo de energía y realizar un proceso más eficiente. Cabe destacar que además del ángulo de ataque existen otros factores, como la altura del lifter, la velocidad de rotación del molino, el porcentaje de llenado de este mismo, tipo de bolas utilizadas, entre otros. El ángulo de ataque es uno de los parámetros esenciales y que más efecto generan en el consumo energético.

En la figura 2 se observa el efecto del ángulo de ataque (distintas curvas, donde "A" hace referencia al ángulo y el valor que lo acompaña corresponde al ángulo de ataque, por ejemplo, "A 30", es el lifter con un ángulo de ataque de 30°) para distintas velocidades de rotación, lo cual entrega la potencia necesaria para cada una de las combinaciones que se generan entre el ángulo de ataque y la velocidad de giro.

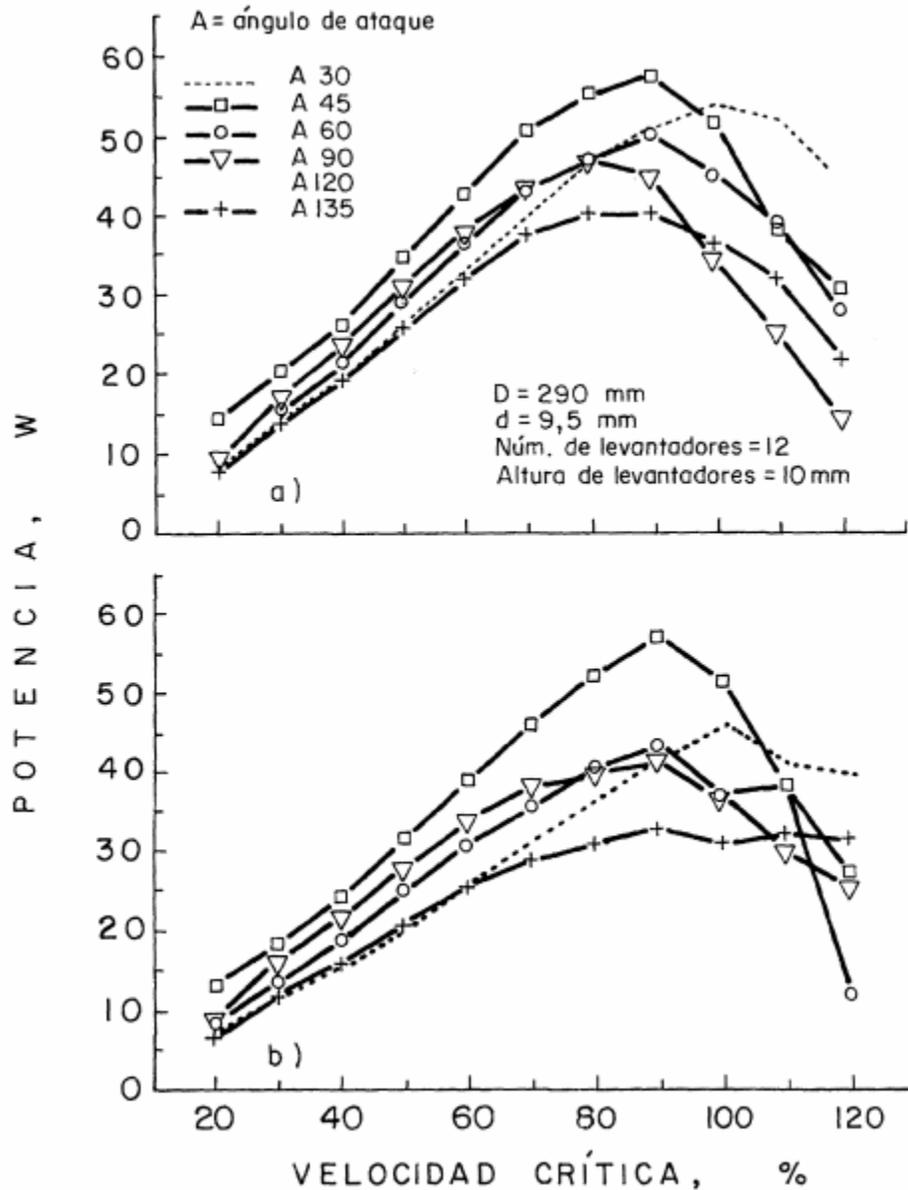


Figura. Curvas de consumo de potencia en función de la velocidad de rotación para diferentes ángulos de ataque. Nivel de llenado de bolas. a) 40%, b) 30%. Fuente: Valderrama y Magne

Como se observa en la figura, a medida que aumenta el ángulo de ataque, disminuye la potencia consumida, a excepción del ángulo de 30°, que presenta un comportamiento debido a posibles deslizamientos de la carga.

Por lo tanto, el revestimiento influye en forma relevante en el consumo de potencia de un molino, además se concluye que el ángulo de ataque de 45° es el que presenta un mayor consumo.

Mayor información en:

Valderrama, W y Magne, L 1995, Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia en molienda (https://www.researchgate.net/publication/47355954_Efecto_del_diseno_de_revestimientos_sobre_el_consumo_de_potencia_en_molienda).

5.1.6 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</p> <p>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 = 87.040kWh/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>87.040 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 del Molino SAG en 5%.</p> <p>TECK RESOURCES CHILE.</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, con el objetivo de reducir el tamaño o granulometría del mineral que entra a la molienda, utilizando menor energía en el proceso.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 8,9 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 1.042 [t CO₂-e]/año</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero. TECK RESOURCES CHILE. 2020</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</p> <p>Optimización de setting chancadores de cono, Planta 10K. TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>Medida:</p> <p>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.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 4,1 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 471 [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>Verificación de eficiencia en subetaspas de chancado</p> <p>Instalar variadores de frecuencia en harneros de Planta 20K</p> <p>TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>Medida:</p> <p>Reducir el consumo de energía eléctrica con la instalación de variadores de frecuencia.</p> <p>Se estima que se consumiría un 40% menos de energía eléctrica por harnero.</p> <p>Se instalan VDF en el sistema de correas, para controlar la velocidad y golpes de carga.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 0,9 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 103 [tCO₂-2]/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>Molienda eficiente mediante sistema de control</p> <p>Aumento de Eficiencia Energética mediante APC Profit. Scm</p> <p>MINERA LUMINA COPPER CHILE. CASERONES</p>	<p>Medida.</p> <p>Incorporación de estrategias de eficiencia energética en el sistema de control de molienda SAG, que correlaciona reducciones en consumo con parámetros operacionales.</p> <p>Ahorro:</p> <p>23,6 millones kWh / año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero. SCM MINERA LUMINA COPPER CHILE. MINERA CASERONES.2020.</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_LuminaCooper_Caseros2019.pdf</p>
<p>Molienda eficiente mediante sistema de control</p> <p>Rendimiento Molino SAG</p> <p>MINERA LOS PELAMBRES ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida:</p> <p>Aumento del rendimiento del Molino SAG a través de la optimización del F80, gestión de pebbles y estrategia Net Metal Production (NMP).</p> <p>Ahorro:</p> <p>Ahorro: 62.478 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 25.559 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>
<p>Implementación de estrategia Mine To Mill</p> <p>Reducción Consumo Específico SAG. MINERA CENTINELA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida</p> <p>Reducción de la energía específica en el Molino SAG debido a la iniciativa Mine to Mill. "Optimización Mine to Mill": los procesos en la cadena de valor de Mine to Mill se gestionan como procesos interdependientes, y donde la fragmentación por voladura (o granulometría) juega un papel fundamental en los procesos aguas abajo, especialmente en los molinos AG/SAG.</p> <p>Ahorro:</p> <p>23.002 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 9.224tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>
<p>Molienda eficiente mediante sistema de control</p> <p>Utilización Chancador 1°, 2° y 3°</p> <p>MINERA ANTUCOYA ANTOFAGASTA MINERALS</p>	<p>Medida:</p> <p>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.</p> <p>Ahorro:</p> <p>2.744 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 1088 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía</p> <p>Y Consejo minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>

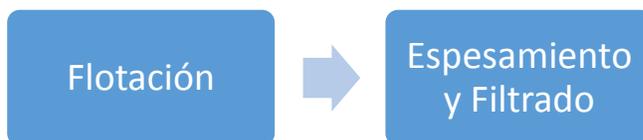
<p>Cambio de diseño y materiales de molinos</p> <p>Modificación Diseños y Materiales Molinos de Bolas</p> <p>MINERA ESCONDIDA</p> <p>BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Se identifica que al realizar el cambio de diseño y materialidad de un revestimiento de molino, esto genera un impacto significativo en la mantenibilidad, operación y consumo energético del equipo. Los revestimientos de acero, se modifican en diseño y en materialidad a diseños doble onda de material compuesto acero-caucho, lo que le permite reducir el consumo energético. La reducción está sujeta a revisión de condiciones de TPH, operativas y de dureza de mineral, y alcanza entre un 3-5% de consumo energético del Molino respecto a materiales de solo acero.</p> <p>Ahorro:</p> <p>30.000 MWh/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>Molienda eficiente mediante sistema de control</p> <p>Priorización de molinos en Molienda Convencional. DIVISIÓN TENIENTE-CODELCO</p>	<p>Medida:</p> <p>Se detectó oportunidad de mejorar la eficiencia del conjunto de molinos al priorizar los más eficientes. Se implementó un protocolo que señala el orden en que deben usarse los molinos dependiendo del nivel de carga de la planta.</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía</p> <p>Y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>
<p>Optimización de ángulo de ataque en lifters dentro de molinos</p> <p>Optimización ángulo de levante de lifters molino SAG.</p> <p>TECK RESOURCES CHILE.</p>	<p>Medida:</p> <p>La optimización del ángulo de ataque en los lifters es una de las variables más influyentes en el consumo de potencia de molinos. Debido a esto, se optimizó el ángulo de ataque esperando una disminución de 3 a 4% del consumo eléctrico. Se instalan sistemas tipo Pull – lifters (modificar el ángulo) para asegurar que la pulpa de la molienda se desplace con mayor facilidad hacia el trommel (más rapidez en la evacuación) y con ello evitar que se acumule dentro del molino y así gastar mayor energía en el proceso de molienda.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 12,2 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 1.413 [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>Gestión de Energía</p> <p>Instalación de VDF en harnero SAG.</p> <p>TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>Medida:</p> <p>Consiste en la instalación de un Variador de Frecuencia en el harnero del Molino SAG para reducir y controlar el consumo de corriente, potencia y velocidad. Se instalan VDFs.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 0,5 [TJ]/año</p> <p>Reducción emisiones gases: 63 [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>Molienda eficiente mediante sistema de control</p> <p>Sistema Control MPC Molinos SAG Concentradora LA-GUNA SECA BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Reemplazo del software de sistema de control molinos SAG4 y SAG5 (“sistemas expertos” se reemplazan por sistemas “Model Predictive Controller”). 0.6% reducción de potencia demandada</p> <p>Ahorro:</p> <p>2.6 % aumento en Toneladas por hora procesadas. 1.789.943 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>Overhaul en Planta Concentradora (cambio de estator Molino Bolas 1013)</p> <p>COLLAHUASI</p>	<p>Medida:</p> <p>Trabajos de reacondicionamiento de la Planta Concentradora, que incluyeron recambio del equipamiento mayor y mejora en el desempeño energético del subproceso de molienda y clasificación, que pasó a tener un desempeño de 14,3 [kWh/kTon] en Q1 de 2017 a un desempeño de 13,3 [kWh/kTon] en Q4 de 2017, luego de la mantención. Lo anterior también significó un 7% de mejora en el Indicador de Desempeño Energético (IDE) para los procesos de molienda y clasificación.</p> <p>Ahorro:</p> <p>50 GWh /año</p> <p>Reducción de emisiones: 25.000 [tCO2-e]/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía y Consejo Minero.</p> <p>Compañía Minera Doña Inés De Collahuasi Scm. 2018</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/05/Collahuasi.pdf</p> <p>Reporte de sustentabilidad 2017; Collahuasi.</p>
<p>Selección de molinos de rodillos de alta presión.</p> <p>Mina Cerro Verde</p>	<p>Molinos HPGR</p> <p>La mina Cerro Verde (Freepor-McMoRan) pudo superar las estimaciones en capacidad productiva en 12.000 tpd por concentrador respectivamente), con una vida útil de los rodillos superior a 10.000 horas en la faena, y un menor consumo de energía respecto del previsto, por debajo de 2,7 kWh/t. En el proceso de chancado y molienda: muchas empresas han pasado de usar molinos SAG, que demandaban 39 megavatios (MW), al uso de una nueva tecnología con molinos de alta presión HPGR, cuyo consumo de energía es de 29 MW.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Hasta 22% en eficiencia en energía</p>	<p>https://vmm.cl/molinos-de-rodillos-a-presion-respuesta-a-la-mayor-dureza-del-mineral/</p> <p>https://tecnologiaminera.com/noticia/energia-sostenible-como-influye-en-la-mineria-moderna-1600407590</p>
<p>Estrategia de control y optimización de la planta de molienda y flotación</p> <p>Mina La Ronde AGNICO EAGLE Canadá</p>	<p>Agnico Eagle LaRonde produce más de 300.000 onzas de oro al año, junto con subproductos de plata, zinc y cobre. La planta LaRonde consta de un circuito de molino de bolas y SAG convencional, seguido de flotación. La gestión de la carga es imprescindible para mantener la estabilidad en el tamaño de la molienda y garantizar la consistencia de la alimentación de flotación.</p> <p>En la flotación, los perfiles de tracción de masa de las células y las tasas de dosificación de reactivos deben gestionarse para maximizar la recuperación, manteniendo la calidad del producto. Esto se logra controlando los puntos</p>	<p>https://www.ceecthefuture.org/resources/case-study</p> <p>https://www.ceecthefuture.org/resources/flotation/apc-at-laronde-the-progressive-control-approach</p>

	<p>de ajuste de adición de aire, nivel y reactivo en todo el circuito. Sin embargo, las alteraciones como la distribución del tamaño de la alimentación, la dureza del mineral y la mineralogía hacen que sea difícil mantener un control eficiente utilizando técnicas de control tradicionales.</p> <p>Por lo tanto, LaRonde trabajó para desarrollar una estrategia de control progresiva, apuntando a la estabilidad y optimización. Esto comenzó con una campaña de actualización de instrumentos de un año de duración, que se centró en optimizar el rendimiento y la confiabilidad de la instrumentación en toda la planta. Luego, el proceso se optimizó, aprovechando los controladores avanzados AwaRE que se ejecutan en bucle cerrado con módulos PARC integrados en el PLC. La instalación de 8 cámaras PFC en flotación cambió la operación de flotación de una estrategia de control de nivel y aire, a una que controla la tracción masiva. Esta nueva filosofía de control ha permitido que la planta administre eficazmente la carga del molino, mejorando el tamaño de molienda y proporcionando un mejor rendimiento de la flotación.</p>	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

5.2 Concentración. Línea Pirometalúrgica

Como su nombre lo indica, el proceso de concentración tiene la finalidad de aumentar el porcentaje de los metales de interés que se encuentran contenidos en una solución acuosa, posterior a la etapa de molienda. En esta etapa, se consideran los procesos de flotación y espesamiento y filtrado.



5.2.1 Flotación

5.2.1.1 Descripción

El proceso de flotación se define como un proceso físico-químico con el cual es posible separar los minerales sulfurados del metal a recuperar. La pulpa proveniente de la molienda, la cual ya considera los reactivos necesarios para la flotación, alimenta las celdas de flotación en cuyo fondo se generan burbujas de aire, lo cual mantiene la pulpa en un proceso de agitación continua. En efecto, esto último permite que todas las partículas de mineral mantengan el contacto apropiado con los reactivos, el agua y el aire, haciendo que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente. Las burbujas de aire generadas en este proceso llevan consigo hacia la superficie los minerales sulfurados, los que rebasan por el borde de la celda hacia ductos que los conducen hacia otras celdas, bombas o espesadores. Este proceso se repite en varios ciclos, lo cual permite obtener un producto cada vez más concentrado. En términos concretos, la flotación considera la coexistencia de la fase sólida, líquida y gaseosa, donde la primera fase representa el material sólido que es de interés de recuperar,

la segunda representa el medio de transporte que permite llevar a cabo esta recuperación, y, la tercera representa las burbujas generadas en cuya superficie se adhieren las partículas sólidas.



Ilustración 15. Proceso de flotación. Fuente: [23].

5.2.1.2 Caracterización Energética

La principal fuente energética empleada en el proceso de flotación corresponde a la energía eléctrica [24], cuyo nivel de consumo respecto a los demás procesos asociados a la etapa global de Concentración es del 25% [25]. Tal consumo energético se atribuye fundamentalmente al uso de impulsores eléctricos al interior de las celdas de flotación, bombas de alimentación, sopladores de aireación y molinos de remolienda.



Ilustración 16. Distribución de consumo en plantas de Concentración. Fuente: [25]

A continuación, se presenta el equipamiento energético que permite llevar a cabo el proceso de flotación para una planta en particular [26]:

1. 38 Celdas de flotación. Potencia eléctrica de cada celda: 150 kW.
2. 1 Molino de remolienda. Potencia eléctrica: 1.865 kW.
3. 1 Molino de remolienda. Potencia eléctrica: 597 kW.
4. 4 Bombas de alimentación de ciclo de remolienda. Potencia eléctrica de 1 bomba: 525 kW.
5. 2 Bombas de By-Pass. Potencia eléctrica de 1 bomba: 30 kW.
6. 2 Bombas de By-Pass. Potencia eléctrica de 1 bomba: 45 kW.

5.2.2 Espesamiento y Filtrado

5.2.2.1 Descripción

Los procesos de espesamiento, sedimentación y filtrado tienen el propósito de reducir los niveles de humedad de la pulpa procedente de la etapa de flotación hasta alcanzar niveles que oscilan en un 8 a un 15% [27].

El proceso de espesamiento se lleva a cabo en espesadores, los cuales corresponden a estanques de forma cilíndrica con fondo de cono y de gran ángulo, y que operan en base a un rastrillo que empuja lentamente hacia el centro las partículas sólidas que se van depositando en el fondo en forma de barro. Dentro de esta etapa, ocurre la sedimentación, la cual consiste en la separación de las partículas sólidas del líquido presente en la pulpa. Cabe señalar que para llevar a cabo este proceso de manera exitosa, es necesario emplear floculantes, los que corresponden a sustancias químicas que aglutinan el mineral facilitando su decantación y posterior filtrado [28]. Una vez que el material ha sedimentado, este se lleva a la etapa de filtrado, en el cual la pulpa se pone en contacto con un material poroso a través del cual fluye el líquido presente en el concentrado, donde, para hacer más efectivo este proceso se emplean elementos que ejercen presión a la pulpa contra el material permeable para así facilitar el paso de agua por dicho material. Asimismo, existe la opción de aplicar aire de alta presión para llevar a cabo esta tarea.



Ilustración 17. Proceso de espesamiento y filtrado. Fuente: [29]

5.2.2.2 Caracterización Energética

La principal fuente energética empleada en los procesos de espesamiento y filtrado corresponde a la energía eléctrica, cuyo nivel de consumo respecto a los demás procesos asociados a la etapa global de Concentración es del 12% [25]. Tal consumo energético se atribuye fundamentalmente al uso de espesadores, sistemas de bombeo, filtros y en algunos casos, compresores de aire.



Ilustración 18. Distribución de consumo en plantas de Concentración. Fuente: [25]

A continuación, se presenta el equipamiento energético que permite llevar a cabo el proceso de espesamiento y filtración para una planta en particular no necesariamente representativa [26]:

1. 1 espesador de concentrado. Potencia eléctrica: 5,6 kW.
2. 1 Filtro de prensa. Potencia eléctrica: 45 kW.
3. 2 Bombas de agua recuperada. Potencia eléctrica de 1 bomba: 23 kW.

5.2.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.2.3.1 Utilización de celda eficiente de flotación tipo Jameson. M10.1

Medida de diseño

Medida eléctrica

La celda Jameson es una celda de flotación de alta intensidad que puede crear circuitos de flotación de menor costo, más eficientes y con mejor rendimiento. Su funcionamiento se basa en una flotación intensa que se logra mediante la generación de un chorro a presión altamente cortante que crea una zona de mezcla de alta intensidad, lo que produce una nube de burbujas finas que se mezclan rápidamente con partículas. Las burbujas de aire finas permiten una alta carga de transporte de sólidos por burbuja de aire, lo cual se traduce en mayores tasas de producción en un espacio reducido.

La capacidad de producción asociada a una celda de esta tecnología puede alcanzar más de 3.000 m³/h y es capaz de producir una tasa de concentrado de 130 tph. Por otra parte, debido a las burbujas de aire fino, la mezcla intensa, la alta probabilidad de contacto y la alta carga de burbuja/partícula, mediante el proceso de flotación se logran altas recuperaciones y leyes. En términos energéticos, al no existir rotores, ni compresores, ni sopladores, el único consumo de energía que posee es el relativo a la bomba de alimentación, con lo que se pueden alcanzar eficiencias energéticas significativas en relación a una celda convencional mecánica, neumática o de columna (Aire, s.f.).

Cabe señalar que el rendimiento óptimo de la celda Jameson se mantiene mediante la entrega de un caudal volumétrico constante de pulpa en cada tubo de descenso. Aunque las plantas de operación experimenten flujos de proceso fluctuantes, la celda Jameson está equipada con un sistema de recirculación de pulpa que compensa automáticamente las variaciones en la alimentación. Por último, es importante indicar que el uso de este tipo de celdas de flotación es factible de considerar tanto para plantas nuevas como para la expansión de plantas existentes (Jameson Cell).

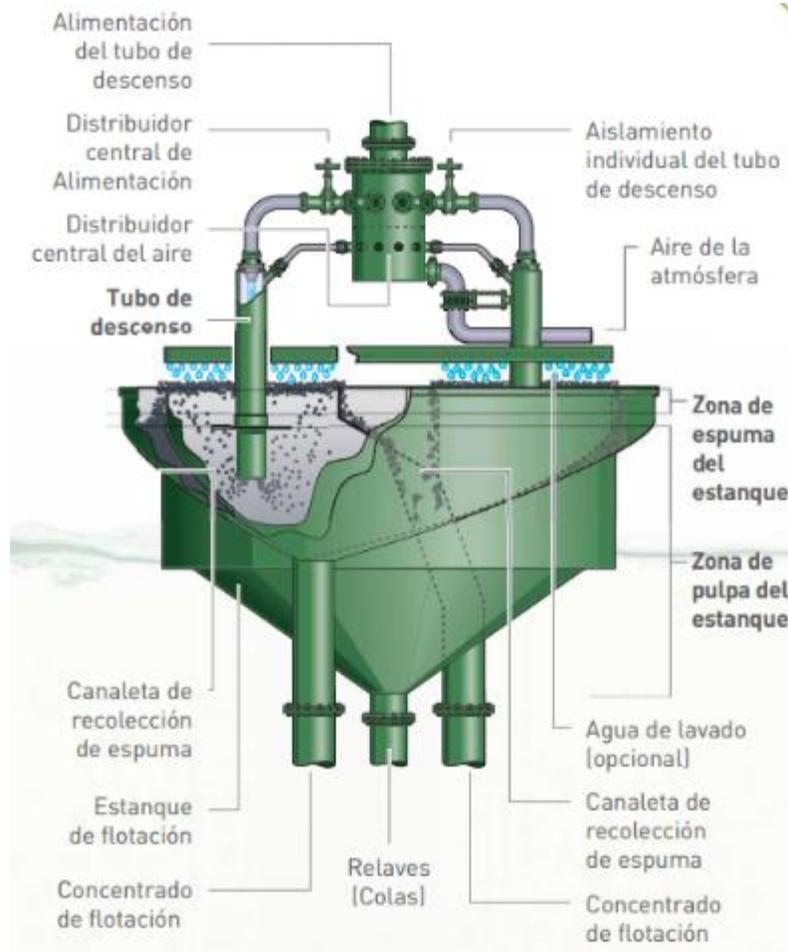


Figura. Esquema de la celda tipo Jameson. Fuente: (Jameson Cell)

5.2.3.2 Implementación de sistemas de control y optimización de proceso de flotación. M10.2

Medida operacional

Medida eléctrica y de control

Es posible obtener un buen rendimiento de una planta de flotación, no obstante, a menudo es complejo mantener dicho rendimiento. Las tasas de recuperación de una planta de flotación suelen ser cercanas al 90% en las plantas de metales base, y cercanas al 60-70% en plantas de PGM (Platinum Group Metals). De dichas tasas de producción, se puede desprender que la flotación es uno de los procesos menos eficientes dentro del ciclo de beneficio del mineral. Por esta razón, es que en el último periodo se ha profundizado en lo que respecta la estabilización y optimización de los circuitos de flotación mediante diversas herramientas de control.

La mejora del funcionamiento del proceso de flotación puede lograrse mediante una mejor estabilización, regulación y optimización del circuito de flotación. Una vez que se logra un funcionamiento estable, se observa el verdadero rendimiento de la planta, lo cual permite aplicar estrategias de optimización. Cabe señalar que hay muchas variables a tener en consideración cuando se trata de optimizar un circuito de flotación, entre ellas figuran la atracción de la masa, las concentraciones de reactivos, las tasas de flujo de aire y los puntos de ajuste del nivel.

No obstante, a pesar de esta multiplicidad de variables, actualmente existen herramientas que controlan los tiempos de residencia y los flujos circulantes en el circuito que permiten optimizar la calidad del producto. En efecto, controlando los tiempos de residencia y los flujos de masa optimizados en todo el circuito, debería haber una mejora significativa en el rendimiento global del proceso. Además, con el balance de masa y flujo adecuadamente controlados, la adición de reactivos puede ser ajustada para lograr la calidad deseada del producto final (Smith, Jordaan, & Singh, 2004).



Figura. Flotadores. Fuente: Revista Minería Chilena.

5.2.3.3 Implementación de un sistema de control en proceso de espesamiento. M10.3

Medida operacional

Medida eléctrica y de control

Estos equipos suelen operar de forma continua con una disponibilidad en línea muy alta y enfrentándose a constantes variaciones operacionales. Por esta razón, es recomendable implementar una estrategia de control que permita contribuir a un resultado óptimo mediante la supervisión y control de parámetros tales como la tasa de floculantes, la tasa de underflow y la tasa de alimentación. Cabe señalar que esta última por lo general, se utiliza sólo en caso de emergencia para evitar que afecte la producción de la planta. A partir del control de estas variables, es posible modificar otras como la densidad del underflow, la turbidez del overflow, el nivel de interfase de sólidos (profundidad del lecho), la masa de sólidos, la tasa de sedimentación de sólidos y la viscosidad del underflow.

Las herramientas de control tienen por objetivo supervisar las condiciones de funcionamiento y el rendimiento, estabilizar las operaciones en función de las condiciones de operación y alimentación y, por último, optimizar el rendimiento en función de los objetivos operativos. Para ello, hoy en día, se emplean controladores lógicos programables (PLC), los sistemas de control distribuido (DCS) y los sistemas de control experto. Los controladores lógicos programables se utilizan normalmente para realizar funciones de arranque y parada. Por otra parte, los sistemas de control distribuido se utilizan para coordinar toda la vigilancia de datos del proceso y el posterior control estabilizador de los parámetros más relevantes. En cuanto a un sistema experto implementado en un proceso de espesamiento, este por lo general se basa en un sistema de monitorización que supervisa el rendimiento del circuito de los espesadores, con el fin de controlar dicho parámetro mediante el control de variables como la dosis del floculante y las tasas de descarga de cada espesador (EIMCO, 2009).

Espesador / Concentrador

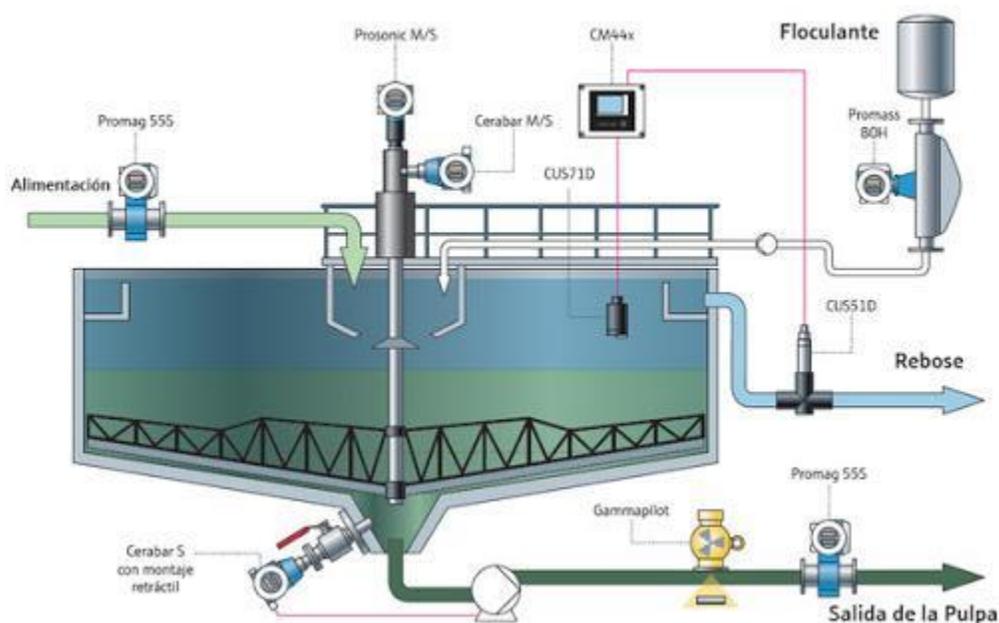


Figura. Esquema espesadores. Fuente: Revista Electroindustria.

5.2.3.4 Renovación/sustitución de espesadores. M10.4

Medida operacional

Medida eléctrica

Los espesadores, como la mayoría de las tecnologías de procesamiento de minerales, son equipos de geometría fija cuyo rendimiento y función son específicos. Durante su ciclo de vida útil, la cual supera los 20 años, operan frente a cambiantes condiciones mineralógicas y a cambios externos en el entorno operativo, escenario que en el caso de no gestionarse o abordarse correctamente, puede influir directamente en la sostenibilidad de la operación, posibilitando a:

1. Un consumo excesivo de productos químicos.
2. Un aumento del consumo de agua.
3. Costos excesivos de mantenimiento – directos e indirectos.

4. Una reducción de la eficiencia y el rendimiento de filtros.
5. Una falta de disponibilidad.
6. Una operación energéticamente ineficiente.

Considerando estas repercusiones, se encuentra la opción de invertir en un nuevo equipo o renovar/modernizar el existente. Para saber qué medida tomar, se debe considerar en primer lugar las limitaciones físicas del tanque existente, y preguntarse lo siguiente: ¿Permitirán los parámetros de proceso propuestos, cargas de sólidos y tasas de aumento que proporcionen un rendimiento adecuado con el material de alimentación esperado? ¿La condición del tanque y la estructura son propicias para alargar la vida útil en 5, 10 o 20 años, considerando la posibilidad de aumentar el nivel de carga con el transcurso del tiempo?

Asumiendo que el diámetro y el estado del tanque son adecuados para cargas mayores, es posible modernizar las condiciones operacionales y estructurales del espesador. Por ejemplo, la altura de las paredes laterales puede aumentarse, la capacidad de overflow puede aumentarse con nuevas lavanderías y/o nuevas cajas de overflow, el ángulo del suelo puede incrementarse, las disposiciones de underflow pueden modificarse, entre otras opciones. La modernización se convierte en una opción atractiva ya que el espesador se encuentra dentro de los límites de la planta y no requiere nuevos servicios. En caso contrario, se encuentra la opción de invertir en un espesador nuevo que cumpla con las condiciones de operación requeridas (Outotec, 2016).



Figura. Espesador. Fuente: Revista Energiminas.

5.2.3.5 Implementación de espesadores de alta velocidad. M10.5

Medida de diseño

Medida eléctrica y de control

Los espesadores de alta velocidad están diseñados específicamente para maximizar la eficiencia de floculación, diferenciándose de los espesadores convencionales en el diseño, tamaño y control del pozo de alimentación.

El aumento de la eficiencia de la floculación que se logra en los espesadores de alta velocidad permite obtener una tasa de sedimentación 2 a 10 veces mayor que la obtenida en un espesador convencional, reduciendo así las necesidades de superficie requeridas para la operación.

En consecuencia, el cambio de velocidad de alimentación de los sólidos o de las características de sedimentación de éstos modificará el nivel de los lodos de forma más acelerada, por lo que los espesadores de alta velocidad requieren algún tipo de control automático.

Los parámetros de control utilizados para mantener un funcionamiento estable en los espesadores de alta velocidad son la densidad de los sólidos del underflow, la tasa de descarga del underflow, la dosificación de floculante, el inventario de sólidos en el tanque, la tasa de alimentación de sólidos, y la restricción del límite del torque mecánico asociado al mecanismo del rastrillo giratorio (Steyn).

Más información de cómo funciona un espesador de alta velocidad:

<https://www.mclanahan.com/es/biblioteca-de-recursos/c%C3%B3mo-funciona-un-espesador-de-alta-velocidad>



Figura. Espesadores de alta velocidad. Fuente: McLanahan.

5.2.3.6 Recomendaciones Generales y monitorización en el proceso de espesamiento. M10.6

Medida operacional

Medida eléctrica

Las medidas de eficiencia que pueden ser ejecutadas tienen directa relación con los equipos participantes en el proceso de espesamiento, donde se considera el sistema de bombeo del fluido como parte relevante de él. Dentro de las recomendaciones a considerar para este equipamiento están:

- **Características del líquido:** Las condiciones del fluido a manejar, tienen consecuencias sustantivas sobre la operación de las bombas centrífugas. Ya que pueden afectar la construcción del equipo, y, por lo tanto, el rendimiento y la potencia. Entre las más importantes tenemos la corrosión, temperatura a manejar, tamaño de partículas en el líquido y uso al que se destinará, entre otras.

- **Pérdidas en motor y acoplamiento:** Aunque son externas a la bomba, es conveniente saber que estos componentes influyen en la eficiencia global. Es importante aclarar que el montaje apropiado del conjunto bomba-motor es necesario, para asegurar la máxima eficiencia.
- **Pérdidas en la bomba:** Las vibraciones, ruido, movimientos y desbalance del equipo tienen consecuencia en la operación hidráulica, ya que se afectan tolerancias y cargas, reduciendo la capacidad real del mismo, requiriendo para ello una mayor potencia y como consecuencia disminuye la eficiencia. La densidad menor de la mezcla provoca una reducción en el volumen real bombeado y, por lo tanto, la eficiencia disminuye. Asimismo, se inducen vibraciones y si el fenómeno es severo, puede causar daños internos a otras instalaciones y equipos e incluso el colapso del propio impulsor.

Existen muchos indicadores clave (Key Performance Indicators, KPI) que muestran el estado de ejecución del proceso de Espesamiento, y todos deben medirse de modo preciso y fiable. La presión hidráulica, la altura y la masa del lecho son algunos de los puntos de medición críticos en el mezclador, así como la densidad y tasa de circulación del flujo de salida del fondo, la claridad del flujo en la superficie y la tasa de alimentación de sólidos en seco. El reto es disponer de todos estos datos monitorizados y controlados a fin de que el proceso de espesamiento sea más eficaz. Algunos aspectos importantes para considerar en la eficiencia del proceso son:

- **Giro y elevación del rastrillo:** Para rastrillos de transmisión hidráulica, es necesario medir la presión hidráulica para monitorear posibles problemas en el proceso, como una tasa de bombeo insuficiente en el flujo de salida del fondo o bloqueos en las salidas de descarga. Ello provoca o tiempos de parada del proceso o bien un levantamiento del rastrillo para reducir el torque.
- **Altura del lecho:** La altura del lecho suele señalarse como el parámetro más valioso porque informa sobre la posición del lecho sedimentado. Esta información se analiza y envía para ajustar la relación gramo/tonelada para la alimentación de floculante sólido.
- **Masa del lecho:** Se conoce la cantidad de sólidos sedimentados en el espesador mediante un transmisor de presión que detecta el incremento de la masa del lecho. El sensor está instalado en el cono de descarga y puede controlar la velocidad de bombeo de la pulpa (concentrado o relave, dependiendo del espesador) en el fondo para lograr una masa constante en el lecho. La superficie de cualquier sensor que esté en contacto con el lodo debe ser resistente a las partículas abrasivas y ha de ser limpiada con regularidad debido a la formación de adherencias.
- **Densidad del flujo de salida del fondo:** Para controlar el porcentaje final de sólidos, se instala un densímetro radiométrico no-invasivo en la tubería de salida. La densidad del flujo de salida del fondo es importante para mantener la estabilidad operativa de la aplicación y evitar el bloqueo de residuos en la salida de descarga del espesador.

- **Tasa de circulación del flujo de salida del fondo:** Un flujómetro volumétrico instalado en línea con un densímetro puede proporcionar la tasa de circulación del flujo másico de sólidos en seco con respecto al volumen total del lodo residual que se desecha.
- **Claridad superficial:** Para garantizar la calidad y confirmar la claridad final del agua, un sensor de turbidez monitoriza el transporte de partículas sólidas.
- **Tasa de alimentación de sólidos en seco:** Para poder utilizarse como señal de realimentación positiva en el circuito de control de dosificación del floculante, pueden instalarse un par de densímetros radiométricos y un flujómetro en línea. Así, es posible prever la dosis de floculante en función de la cantidad de entrada de sólidos en seco que se espera, y no solo a partir de lo que sucede con el nivel y la masa del lecho.

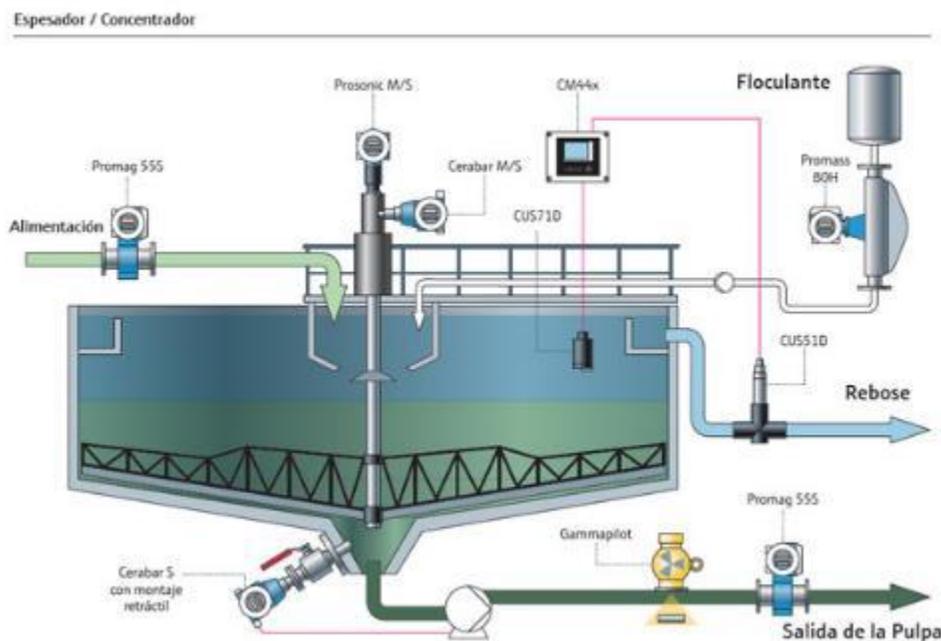


Figura. Esquema de un espesador. Fuente: Revista Electroindustria

Fuentes de información e imagen:

<http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1929/MoraAlvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2491&ni=optimizacion-del-espesador-para-reducir-los-costos-de-produccion>

5.2.3.7 Filtro Hiperbárico. M10.7

Medida de diseño

Medida eléctrica

El producto final de las plantas de concentración se obtiene después de una última etapa de separación de sólido-líquido, que es la filtración. La alimentación a la filtración consiste en una pulpa con un 50 a 60% de contenido de sólidos, proveniente de una etapa de espesamiento, obteniéndose como producto un concentrado con una humedad del orden de 10%. Con esta humedad, el concentrado puede ser manejado adecuadamente en cancha para su posterior carguío, transporte y alimentación a las operaciones siguientes, normalmente en una fundición. El agua recuperada en la filtración se recircula a la planta. Con la creciente necesidad de moliendas más finas para procesar minerales de leyes más bajas y más complejos, la exigencia en materia de filtrado también ha aumentado. Las pulpas que contienen partículas más finas filtran más lentamente, afectando negativamente el rendimiento del proceso, así como el objetivo de humedad del producto.

Dentro de los diferentes tipos de filtro, la principal desventaja de los filtros al vacío, comparados con los filtros de presión, es la menor diferencia de presión que se alcanza para el proceso, lo que se acentúa en operaciones a gran altura. Para compensar esta deficiencia se han desarrollado los llamados filtros hiperbáricos (HBF), que puede ser un filtro de discos, de tambor o de banda, inmerso en una cámara presurizada, lo que permite aplicar una mayor diferencia de presión que la alcanzable con el vacío convencional.

Los filtros hiperbáricos se desarrollaron inicialmente en los años ochenta para la filtración de carbón flotante en Europa. Mediante desarrollos y modificaciones especiales posteriormente se hizo posible el uso de esta tecnología en la industria minera, en especial del cobre.

Para la implementación de este tipo de filtros se debe tener especial consideración en aumentar la disponibilidad electromecánica, lo que se puede alcanzar mediante:

- Un diseño optimizado de células filtrantes. De este modo se puede alcanzar un aumento en la vida útil de la tela filtrante.
- Minimización de partes móviles: Las partes móviles están sujetas a un desgaste considerable, sobre todo en los cojinetes. El concepto general de los HBF reduce las partes móviles al máximo posible.
- Minimización del número de ciclos: Mediante tolvas para la descarga de la filtración y mediante posibles redimensionamientos del volumen de circuitos intermedios para reducir el número de ciclos de las tolvas.
- Empleo de materiales resistentes al desgaste: utilización de tubos de filtrado, cabezales de control y tuberías fabricados de materiales especiales y resistentes y con revestimientos de goma donde sea posible.
- Construcción en módulos para una operación de fácil mantenimiento. De este modo, las células filtrantes se pueden cambiar en pocos segundos.

Se ha observado que con el uso de filtros de disco hiperbáricos (HBF) se puede llegar a alcanzar más de cuatro veces el rendimiento de los filtros de disco de vacío, al igual que reducen el contenido de humedad de un 4% a 6%.

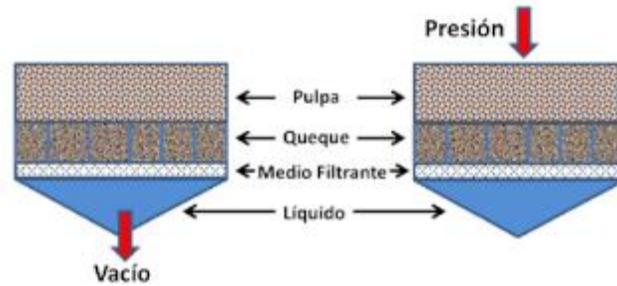


Figura. Esquema de un filtro hiperbárico. Fuente: Fundación tecnológica

Más información:

<https://www.equipo-minero.com/contenidos/desaguee-un-creciente-e-importante-proceso-de-minerales/4/>

http://www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wp-content/uploads/2017/05/Art%C3%ADculo-FT-Bolet%C3%ADn-Minero-1300_2016_06.pdf

5.2.4 Proyectos Implementados

<p>Make Up Agua Planta concentra- dora</p> <p>MINERA CENTI- NELA</p> <p>ANTOFAGASTA MI- NERALS</p>	<p>Medida:</p> <p>Menor consumo de agua fresca por mayor uso de agua recuperada.</p> <p>Ahorro:</p> <p>31.900 MWh/año</p> <p>Reducción emisiones: 12.934 tCO2e/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo Minero. Antofagasta Minerals. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf</p>
<p>Sistema de medi- ción de operación de espesadores</p> <p>Alerta Temprana Espesadores de Re- laves</p> <p>CODELCO</p>	<p>Medida:</p> <p>Centro Integrado de Información (CII), en la ciudad de Santiago de Chile, bajo Big Data Science Analytics. Recibe, identifica y procesa en forma remota una gran cantidad de datos en tiempo real proveniente de cientos de sensores instalados estratégicamente en los espesadores de las distintas divisiones (plantas) de la empresa, para tomar decisiones sensibles e informadas respecto al comportamiento y funcionamiento eficiente de los espesadores, especialmente frente a la seguridad de los trabajadores y el uso eficiente del agua y la energía utilizados en estos procesos.</p>	<p>La eficiencia en el uso del agua y la energía en los procesos mineros: casos de buenas prácticas en Chile y el Perú.</p> <p>(José Luis Lewinsohn; René Salgado, 2017). CEPAL; Cooperación Alemana.</p>
<p>Cambio 10 extrac- tores eléctricos por eólicos</p>	<p>Medida:</p>	<p>Reporte avance del convenio de</p>

<p>COLLAHUASI</p>	<p>Recambio de extractores eléctricos por extractores eólicos, que no consumen energía eléctrica.</p> <p>Ahorro: 220.752 kWh/año</p>	<p>Cooperación entre Ministerio de energía Y Consejo minero Compañía Minera Doña Inés De Collahuasi Scm. 2018</p>
<p>Control de granulometría en proceso de flotación. Minera las Bambas Perú</p>	<p>En MINERA LAS BAMBAS de Perú se realizó un proceso de optimización de la molienda y flotación mediante el uso de la tecnología acústica para la identificación temprana de cortocircuitos e indicador de tamaño de partículas en hidrociclones. El monitoreo en los hidrociclones es individual y en tiempo real, lo que permite: identificar oportunamente un evento de corto circuito y el cambio brusco del tamaño de partícula producto (overflow) en un determinado ciclón; esto permitió evitar arenamientos posteriores en etapa de flotación y disminuir la variabilidad del tamaño de partícula hacia flotación, lo cual mejora la recuperación de cobre. Además, minimiza los daños a los revestimientos de las celdas de flotación, ocasionado por mineral grueso que pasa de la molienda hacia flotación a consecuencia de los corto-circuitos producidos en los hidrociclones, y las paradas del circuito de flotación y molienda por arenamientos prolongados, permitiendo el funcionamiento controlado a la máxima capacidad.</p>	
<p>Implementación de Filtro Hiperbárico Anglo American</p>	<p>Mina Los Bronces de Anglo American tiene un proyecto de filtración hiperbárica. Los filtros hiperbáricos, puede ser un filtro de discos, de tambor o de banda, inmerso en una cámara presurizada, lo que permite aplicar una mayor diferencia de presión que la alcanzable con el vacío convencional. Permite obtener humedades más bajas y rendimientos más altos.</p>	<p>http://www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wp-%20content/uploads/2017/05/Art%C3%A9culo-FT-Bolet%C3%ADn-Minero-1300-2016-06.pdf</p>
<p>Mejoramiento del proceso por cambio de celdas de flotación en la planta de concentrados de Cobre y Molibdeno Mina Sierrita FREEPORT MCMORAN</p>	<p>La mina Sierrita de Freeport McMoran Inc. es una mina de cobre y molibdeno a tajo abierto ubicado al sur de Tucson, Arizona en los Estados Unidos. La planta dispone de un proceso de "flotación por espuma", aprovechando las propiedades físicas y químicas de las pequeñas partículas de mineral de cobre. La medida implementada contempló el reemplazo de un tren de celdas obsoleto del proceso de flotación, por otro mejor y nuevo, aumentando la tasa de recuperación de metales y disminuyendo el uso de energía.</p> <p>El proceso original consistía de 379 celdas de flotación con 247 impulsores eléctricos, cuyos motores variaban de 15 a 75 CV. Muchos motores servían a más de una celda. El proceso original también tenía cuatro sopladores de aireación de 400 hp; tres operativos y uno en stand by.</p> <p>El nuevo sistema de flotación tiene cuatro trenes o paquetes de cinco celdas grandes cada uno. Cada celda nueva de flotación tiene un impulsor con motor de 150 CV y cada paquete de celdas tiene un ventilador de 125 CV que proporciona aireación al proceso. Mediante la sustitución de celdas pequeñas por celdas grandes, la optimización del agitador y los sistemas de aireación, se generó una gran reducción en la demanda de potencia para este proceso de flotación, mejorando el rendimiento de producción y</p>	<p>https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/eficiencia%20energetica/publicaciones/guias/1_%20guia%20mineria%20metalica%20DGEE-1.pdf</p> <p>Fuente: ©2015 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry</p>

	<p>aumentando la recuperación de metal. El resultado fue una reducción general en la intensidad del uso de energía.</p> <p>Ahorro energético: 14.977.598 kWh/año</p>	
<p>Estrategia de control y optimización de la planta de molienda y flotación</p> <p>Mina La Ronde AGNICO EAGLE Canadá</p>	<p>Agnico Eagle LaRonde produce más de 300.000 onzas de oro al año, junto con subproductos de plata, zinc y cobre. La planta LaRonde consta de un circuito de molino de bolas y SAG convencional, seguido de flotación. La gestión de la carga es imprescindible para mantener la estabilidad en el tamaño de la molienda y garantizar la consistencia de la alimentación de flotación.</p> <p>En la flotación, los perfiles de tracción de masa de las células y las tasas de dosificación de reactivos deben gestionarse para maximizar la recuperación, manteniendo la calidad del producto. Esto se logra controlando los puntos de ajuste de adición de aire, nivel y reactivo en todo el circuito. Sin embargo, las alteraciones como la distribución del tamaño de la alimentación, la dureza del mineral y la mineralogía hacen que sea difícil mantener un control eficiente utilizando técnicas de control tradicionales.</p> <p>Por lo tanto, LaRonde trabajó para desarrollar una estrategia de control progresiva, apuntando a la estabilidad y optimización. Esto comenzó con una campaña de actualización de instrumentos de un año de duración, que se centró en optimizar el rendimiento y la confiabilidad de la instrumentación en toda la planta. Luego, el proceso se optimizó, aprovechando los controladores avanzados AwaRE que se ejecutan en bucle cerrado con módulos PARC integrados en el PLC. La instalación de 8 cámaras PFC en flotación cambió la operación de flotación de una estrategia de control de nivel y aire, a una que controla la tracción masiva. Esta nueva filosofía de control ha permitido que la planta administre eficazmente la carga del molino, mejorando el tamaño de molienda y proporcionando un mejor rendimiento de la flotación.</p>	<p>https://www.ceecthefuture.org/resources/case-study</p> <p>https://www.ceecthefuture.org/resources/flotation/apc-at-laronde-the-progressive-control-approach</p>

5.3 Fundición. Línea Pirometalúrgica

El proceso de fundición considera principalmente 5 subprocesos como se describen a continuación:



El proceso pirometalúrgico considera estas 5 etapas consecutivas que permiten incrementar progresivamente la ley o contenido de cobre del material sometido al proceso, desde el 30 a 40% inicial

en el concentrado, hasta el 99,5% presente en el ánodo de cobre resultante de todo el proceso de fundición.

5.3.1 Secado

5.3.1.1 Descripción

Este proceso tiene el propósito de deshumidificar el concentrado procedente de la etapa de concentración, permitiendo alcanzar niveles de humedad que pueden ir de un 8 a un 10%, esto cuando se trata de un secado parcial, o alcanzar niveles de humedad del 0,1 a 0,3% cuando corresponde a un secado total. El objetivo final de este proceso consiste en reducir los costos de transporte, mejorar el carguío y operación de los hornos de fusión y mejorar el balance térmico de la operación de fundición [30].

Por lo general, existen líneas de secado por cada equipo de fusión, las que cuentan con secadores abastecidos térmicamente con vapor de agua cuya temperatura puede bordear los 180°C, y el cual proviene generalmente de calderas de recuperación de calor de los gases generados en la fundición. Los vahos producidos por este proceso y que arrastran partículas de polvo, pasan por un filtro de mangas en donde se recuperan las partículas sólidas, las que se dirigen a la tolva de almacenamiento de concentrado seco. Por otra parte, los vahos limpios son liberados a la atmósfera. Por último, el vapor condensado se dirige a un estanque recuperador de condensados para su posterior reutilización.



Ilustración 19. Horno de Secado. Fuente: [31]

5.3.1.2 Caracterización Energética

Los consumos de energía en el proceso de secado tienen relación con los tipos de secadores que forman parte del proceso, los cuales pueden ser:

1. **Secador giratorio de calor directo:** son aplicables a materiales en formas granulares que no son sensibles al calor y no son afectados por el contacto directo con gases de combustión. La transferencia de calor es principalmente por convección. Permite un secado rápido, pero posee gran requerimiento de espacio y mayores requerimientos de mantención.
2. **Secador giratorio de calor indirecto:** son aplicables a materiales sensibles al calor y son afectados por el contacto directo con gases de combustión. El material entra en contacto solo con la superficie caliente del cilindro que es calentada externamente con gases de combustión o vapor. La transferencia de calor se realiza principalmente por conducción. Posee un costo de operación y mantención menor al utilizar vapor y en especial con recuperación de calor de los hornos de fundición.
3. **Secador de Lecho fluidizado:** es un método muy eficaz de secado de partículas sólidas. La superficie de cada partícula individual es expuesta para su secado al suspenderla en el flujo de aire, lo que resulta en una mejor transferencia de calor y en un menor tiempo de secado. La temperatura homogénea del producto y el secado uniforme del producto se logran a través de la continua y minuciosa mezcla y control del aire de secado de entrada y de salida. Consideran un consumo de combustible menor que el secador de calor directo, generalmente petróleo 6.

En general, estos equipos forman parte de una línea de fundición específica que forma parte de una tecnología definida, las cuales se presentan a continuación junto con el consumo específico asociado al proceso de secado, diferenciando entre electricidad y combustible. De esta tabla se puede apreciar que en general, la principal fuente energética corresponde a combustibles, cuyo nivel de consumo por tonelada de cátodo de cobre varía entre 300 y 500 kWh.

Tabla 5. Consumo energético en kWh por tonelada neta de cátodo de cobre. Fuente: [32]

Tecnología	Energía Eléctrica	Combustible
Outokumpo Flash Smelting	16,3	310,65
INCO Flash Smelting	10,0	512,87
The Top Blown Rotary Converter (TBRC) Smelting	10,0	512,87
Mitsubishi Continuous Smelting and Converting	-	377,77
Queneau-Schuhmann continuous Smelting	-	431,69
Oxy Fuel Smelting	-	395,64
Oxygen Sprinkle Smelting	-	505,25

5.3.2 Tostación

5.3.2.1 Descripción

Proceso que corresponde a una etapa previa de preparación de los procesos de fusión y conversión, y en el cual se lleva a cabo una oxidación parcial de los sulfuros de concentrados y la eliminación parcial de azufre de éste, a una temperatura de trabajo que oscila entre los 500°C a 800°C.

La tostación parcial del concentrado es actualmente una etapa adicional, que históricamente ha ido perdiendo relevancia en su forma tradicional, pero que con el advenimiento de los reactores de lecho fluidizado ha sido considerada para algunos tratamientos específicos como una forma de aumentar la capacidad en el proceso de fusión.



Ilustración 20. Planta de tostación de lecho fluidizado. Fuente: [33]

5.3.2.2 Caracterización Energética

Al proceso de tostación se le asocia el consumo de electricidad como de combustibles, los cuales poseen un nivel de consumo que varía en función de la tecnología que se aplique. Para la tecnología convencional “Calcine Charge Smelting” el consumo eléctrico corresponde a 62,7 kWh por tonelada de cátodo de cobre; respecto a las tecnologías “Electric Smelting” y “Amax Dead-Roast Blast Furnace Smelting”, el consumo energético respectivamente corresponde a 668,78 kWh y 58,61 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Esta información se representa en la tabla a continuación.

Tabla 6. Consumo energético en kWh por tonelada neta de cátodo de cobre. Fuente: [32]

Tecnología	Energía Eléctrica	Combustible
Calcine Charge Smelting	62,7	-
Electric Smelting	-	668,78
Amax Dead Roast-Blast Furnace Smelting	-	58,61

Respecto a los equipos implementados en este proceso, estos corresponden a hornos de secado, compresores, equipamiento de transporte, entre otros.

5.3.3 Fusión de Concentrados

5.3.3.1 Descripción

El propósito de la fusión es aumentar la concentración del concentrado de cobre proveniente de los procesos previos, y en cuya ejecución es posible distinguir dos fases: la primera es la fase rica en cobre, que corresponde a una fase líquida de sulfuros reconocida como eje de alta ley o mata; y la segunda es una fase líquida oxidada reconocida como escoria, y cuyo nivel de cobre debiese ser lo más bajo posible.

Este proceso por lo general ocurre a una temperatura que bordea los 1.200°C, y se lleva a cabo mediante tres metodologías principales [34]:

1. Calentamiento directo: proceso de fusión llevado a cabo generalmente en hornos de reverbero, donde se realiza la fusión del concentrado mediante la combustión de hidrocarburos.
2. Fusión en baño: proceso que se caracteriza por aprovechar la energía resultante de las reacciones de oxidación que ocurren dentro del reactor de fusión.
3. Fusión Flash: proceso que se fundamenta en la combustión del concentrado con aire, aire enriquecido u oxígeno en suspensión, donde el calor resultante de las reacciones exotérmicas abastece térmicamente al proceso.



Ilustración 21. Proceso de fusión de concentrados. Fuente: [35]

5.3.3.2 Caracterización Energética

El proceso de fusión de concentrados tiene un importante consumo energético asociado al uso de combustibles, tal como se puede apreciar en la tabla siguiente. El nivel de consumo varía en función de cada línea tecnológica, pudiendo ir de un valor cercano a los 400 kWh por tonelada de cátodo de cobre, a sobrepasar los 7.000 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Asimismo, se aprecia el consumo asociado al uso de electricidad, cuyo nivel de consumo es menor, variando entre los 60 kWh y 150 kWh por tonelada de cátodo de cobre.

Tabla 7. Consumo energético en kWh por tonelada neta de cátodo de cobre. Fuente: [32]

Tecnología	Energía Eléctrica	Combustible
Green Charge Smelting	60,8	7.328,54
Calcine Charge Smelting	60,8	4.248,36
Outokumpu Flash Smelting	76,1	-
INCO Flash Smelting	4,5	-
Noranda Continuous Smelting	-	1.089,35
Mitsubishi Continuous Smelting and Converting	150	1.625,37
Oxy Fuel Smelting	60,8	2.716,77
Oxygen Sprinkle Smelting	60,8	402,97

5.3.4 Conversión

5.3.4.1 Descripción

El proceso de conversión de eje de alta ley o mata tiene por propósito eliminar hierro, azufre, y otras impurezas presentes en él, para de esta forma producir cobre metálico “blíster”, cuyo nivel de pureza es del orden del 98,5-99,5% de cobre [36]. Para esto, se requiere oxidar la mata, entre los 1.150 y 1.250°C, mediante el soplado con aire o aire enriquecido, propiciando una escorificación del hierro y una volatilización del azufre como SO₂. En este punto es importante señalar que las reacciones que se llevan a cabo son de carácter exotérmico, permitiendo el desarrollo de un proceso autógeno.

Este proceso puede llevarse a cabo bajo una metodología discontinua o continua. Respecto a la conversión discontinua, esta se basa en una conversión llevada a cabo en distintas cargas, las cuales tienen una secuencia a seguir. En este caso destaca el convertidor Pierce-Smith (CPS). En cuanto a la conversión continua, esta se basa en el ingreso ininterrumpido de mata de cobre y un sangrado continuo de cobre blíster. Para este tipo de procedimiento, destaca la tecnología de conversión flash y Mitsubishi.



Ilustración 22. Planta de fundición. Fuente: [37]

5.3.4.2 Caracterización Energética

En el proceso de conversión, el cual se lleva a cabo mediante hornos que trabajan a temperaturas que oscilan entre los 1.150°C y los 1.250°C, el consumo energético atribuible al uso de combustible varía entre 70 y 160 kWh por tonelada de cátodo de cobre para las tecnologías señaladas en la tabla a continuación. Por otra parte, en este proceso también se emplea la energía eléctrica, cuyo nivel de consumo varía dentro del rango de los 60 y 155 kWh para las tecnologías señaladas.

Tabla 8. Consumo energético en kWh por tonelada neta de cátodo de cobre. Fuente: [32]

Tecnología	Energía Eléctrica	Combustible
Green Charge Smelting	155	158,8
Calcine Charge Smelting	120	93,78
Outokumpu Flash Smelting	60,7	-
INCO Flash Smelting	89,8	-
Noranda Continuous Smelting	-	26,36
Mitsubishi Continuous Smelting and Converting	135	73,26
Oxy Fuel Smelting	155	146,54
Oxygen Sprinkle Smelting	120	67,40

5.3.5 Pirorrefinación

5.3.5.1 Descripción

Luego del proceso de conversión, el cobre blíster aún contiene impurezas y materiales valiosos tales como oro, plata, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, debiendo ser refinado en los hornos anódicos. Este proceso consiste en la refinación cíclica, y se compone por las etapas de llenado, oxidación, escoriado, reducción y vaciado. Cada horno opera de forma secuencial en base a las cinco etapas mencionadas.

Una vez completada la carga del horno, inicia la etapa de oxidación mediante la inyección de aire enriquecido de oxígeno, llevando a cabo la remoción de sulfuros contenidos en el cobre blíster. Asimismo, se lleva a cabo la remoción de otras impurezas contenidos en el baño fundido. Posterior a este proceso de limpieza, inicia el proceso de reducción del nivel de oxígeno presente en el cobre resultante de las etapas previas. Como producto se obtiene cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,6%. Posteriormente, el cobre es enviado a la rueda de moldeo.



Ilustración 23. Proceso de Pirorrefinación y moldeo de ánodos. Fuente: [38].

5.3.5.2 Caracterización Energética

El proceso de pirorrefinación, el cual se lleva a cabo en hornos anódicos del tipo basculantes o del tipo lecho empacado, se caracteriza por tener un consumo energético atribuible fundamentalmente al uso de combustible, cuyo nivel de consumo puede acercarse a los 300 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Asimismo, para este proceso se emplea energía eléctrica, cuyo nivel de consumo puede ser del orden de los 30 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Cabe señalar que estos niveles de consumo son de carácter orientativo, y no corresponden necesariamente a valores representativos.

El otro equipamiento empleado dentro de esta etapa corresponde a la rueda de moldeo, la cual opera en base a energía eléctrica.

5.3.6 Medidas de Eficiencia Energética

5.3.6.1 Implementación de tecnología de secado Kumera. M11.1

Medida de diseño

Medida térmica

La eficiencia energética del secado de concentrado puede mejorarse significativamente mediante la selección de la tecnología a implementar. El moderno secado de vapor indirecto, método empleado en la tecnología Kumera, elimina la necesidad de utilizar gases de convección de alta temperatura como fuente de energía de secado y, por lo tanto, asegura tanto la calidad del producto como la eliminación del riesgo de autoignición. Además, el secado de vapor indirecto en comparación con los secadores convencionales requiere de menor consumo específico de energía, sumado a que permite recuperar calor del mismo proceso para reutilizarlo en otro, lo que finalmente permite reducir el consumo energético global de la planta.

Esta tecnología consiste en un tambor rotativo de 4,4 metros de diámetro que opera a una velocidad ajustable de 0,5 rpm a 2 rpm. Al interior, se encuentra un conjunto de tubos de vapor del tipo modular, característica que permite modificar la superficie de calentamiento y la disposición de los tubos de vapor sin tener que retirarlos en su totalidad, otorgando flexibilidad en la ejecución del proceso. El Centro Tecnológico Kumera ha probado el secador de vapor para una serie de concentrados y minerales no ferrosos, obteniendo como resultado una mayor eficiencia energética del proceso, una menor presencia de desgaste, una menor obstrucción de los tubos de vapor y la reducción de las operaciones de mantenimiento (Berg, Chen, & Mansikkaviita, 2015).



Figura. Tecnología de secado Kumera. Fuente: Kumera.

5.3.6.2 Implementación de hornos de lecho fluidizado. M11.2

Medida de diseño

Medida térmica

Con la introducción de los hornos de lecho fluidizado para tostación, se hicieron posibles nuevas condiciones de operación. Particularmente, el lecho fluidizado se caracteriza por su uniformidad de temperaturas, composición uniforme de gases y de la calcina en cada punto del lecho.

Actualmente, los hornos de lecho fluidizado u hornos de turbulencia constituyen el procedimiento más apropiado para la tostación, debido fundamentalmente a su alto rendimiento específico de tostación, gran capacidad unitaria de tratamiento, buena flexibilidad de marcha y costes reducidos de inversión y operación (Análisis de los procesos tecnológicos de tratamiento de minerales piríticos existentes en el mundo - aplicabilidad en España, 1976).

Esta tecnología se puede categorizar en reactores sólido-gas, debido a que se basan en el movimiento relativo entre un sólido y un fluido gaseoso. En este tipo de reactores la fase sólida se encuentra en mezcla perfecta o muy cercano a ello gracias a la impulsión constante de la fase gaseosa. En concreto, las partículas sólidas son agitadas por efecto del gas (aire u otro) que se inyecta hacia el interior del reactor a través de una superficie transversal inferior llamada distribuidor (placa porosa, placa perforada, toberas de distribución, entre otros), cuya función es distribuir uniformemente el gas al lecho de partículas. Con relación a la temperatura de operación, ésta puede ser cercana a la temperatura ambiente, o cercana a los 1.200°C (donde se produce la calcinación).

En este tipo de reactores, la alimentación debe tener un tamaño de partículas dentro del rango de 5 micrones a 2 a 3 milímetros. Cabe señalar que una limitación severa para los lechos fluidizados con respecto al material a tratar se relaciona con que éste no se adhiera con el resto del sólido en el lecho. Por otra parte, uno de los efectos más indeseables en la operación de los lechos fluidizados es el arrastre de partículas finas, por lo que todos los reactores de lecho fluidizado trabajan siempre en conjunto con un sistema de limpieza de gases (Goñi, 1998).

Dentro de un reactor de lecho fluidizado, se pueden distinguir las siguientes zonas:

- Plenum: zona inferior de la entrada del gas que permite uniformar la presión de soplado a través del distribuidor.
- Distribuidor: elemento cuya función es distribuir uniformemente el gas proveniente del plenum al lecho.
- Zona de desagregación: zona no bien delimitada por sobre la superficie del lecho donde el sólido es eyectado por la erupción de burbujas en la superficie del lecho.
- Zona libre del reactor: zona de expansión donde el arrastre de sólidos es aproximadamente constante. Esta, en algunos reactores tiene un diámetro mayor a la zona del lecho para disminuir la velocidad espacial del gas y reducir así el arrastre del sólido.

En cuanto a las ventajas del empleo de esta tecnología, éstas se pueden resumir en las siguientes:

- Las temperaturas son sensiblemente inferiores, en donde se evita la fusión de cenizas, se reduce la erosión y corrosión.
- Hay una mejor transmisión de calor.
- Se requiere menor exceso de aire.
- Hay mayor inercia térmica del reactor.

- Las instalaciones se caracterizan por ser más compactas.
- Se pueden emplear mezclas heterogéneas de combustible

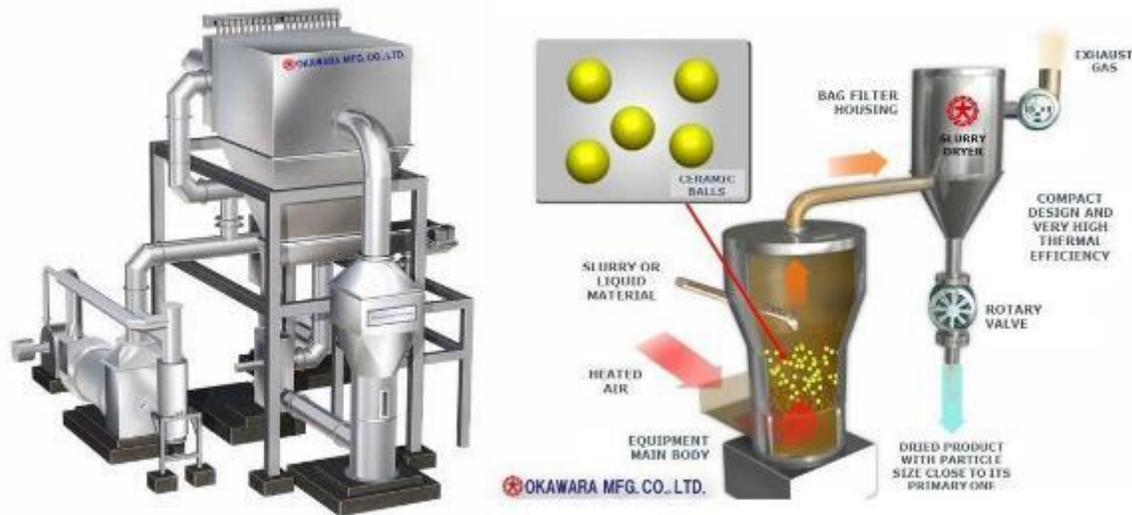


Figura. Horno lecho fluidizado. Fuente: Okawara Mfg. Co. Ltd.

5.3.6.3 Implementación de tecnología de Fusión Flash. M11.3

Medida de diseño

Medida térmica

Actualmente, la mayor parte del cobre primario del mundo se produce mediante la tecnología de fusión Flash, tecnología patentada por Outotec, la cual ofrece técnicas ambientalmente seguras, una operación energéticamente eficiente, una tasa de captura de azufre de más del 99,9%, bajos volúmenes de gas residual, y la posibilidad de recuperación de calor (Outotec, Outotec Flash Smelting Technology, 2014). El proceso de fusión Flash forma parte de un proceso continuo fusión-conversión continua de concentrados, que trabaja en base al calor generado en las reacciones del oxígeno presente en el aire de proceso con los sulfuros de hierro contenidos en el concentrado de cobre. Dependiendo principalmente de las características mineralógicas o químicas del concentrado, de los flujos y enriquecimientos en oxígeno del aire de proceso, en el reactor se generan importantes cantidades de calor, suficientes para generar un proceso totalmente autógeno que alcanza una temperatura de 1.200 °C, sin requerir energía adicional externa. Los productos generados en el proceso de fusión Flash son una fase rica en cobre conocida como eje de alta ley, con un 62-70% de cobre, una escoria con un 1-2% de cobre y 8-12% de magnetita, y una corriente continua de gases con un 30-35% de SO₂ en la salida del horno (Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006).



Figura. Horno fusión flash. Fuente: Revista Minería Chilena.

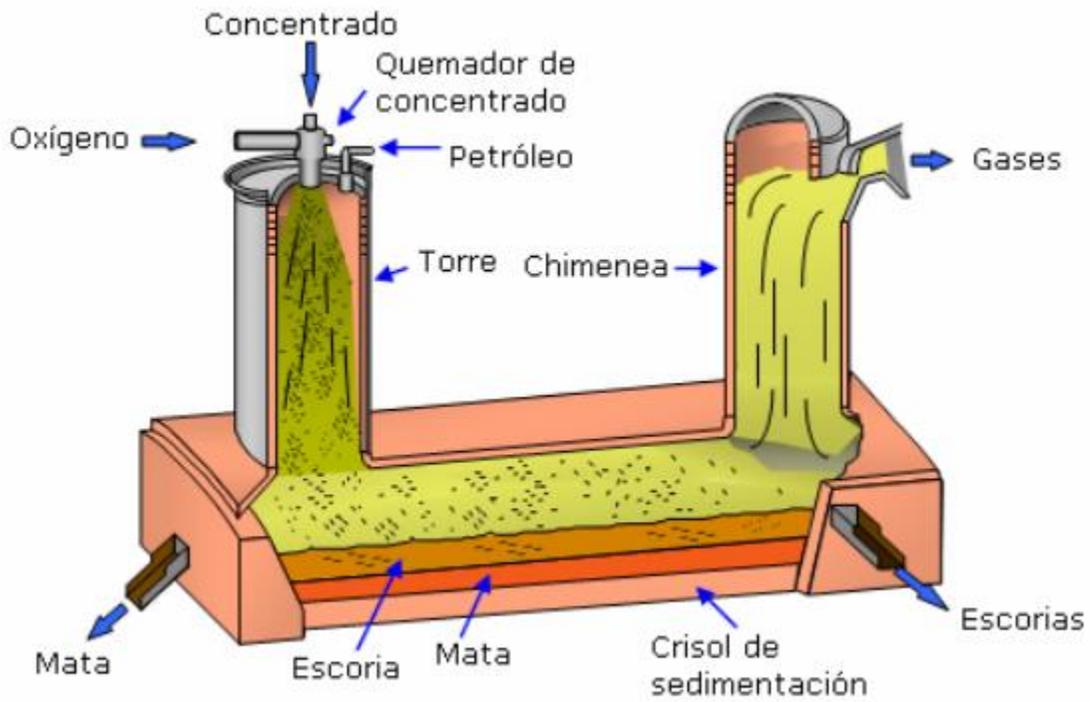


Figura. Esquema Horno fusión flash.

Fuente: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35405/1/02.AMS_MATERIALES_Y_PROCEDIMIEN-TOS.pdf

5.3.6.4 Recuperación de calor en hornos de fundición. M11.4

Medida operacional

Medida térmica

Los métodos de recuperación de calor residual incluyen la captura y transferencia de dicha fuente de energía procedente de un proceso térmico con el fin de crear calor adicional o para generar energía eléctrica y/o mecánica. Según el tipo y la fuente de calor residual, y para justificar qué sistema de recuperación de calor puede emplearse, es esencial investigar la cantidad y el grado de calor recuperable del proceso. Existen muchas tecnologías de recuperación de calor, las cuales consisten fundamentalmente en intercambiadores de recuperación de energía en forma de una unidad de recuperación de calor residual, y las cuales todas basan su funcionamiento en captar e intercambiar calor con un contenido energético potencial de un proceso.

Dentro de las tecnologías disponibles, se encuentran los quemadores regenerativos y de recuperación, los que optimizan la eficiencia energética incorporando una superficie de intercambio de calor para capturar y utilizar el calor residual del gas de combustión procedente de un proceso térmico. Normalmente, los dispositivos regenerativos consisten en dos quemadores con válvulas de control separadas, que están conectadas al horno y que calientan alternativamente el aire que ingresa a éste. El sistema funciona guiando gases de escape del horno a una caja que contiene material refractario, el cual aumenta su temperatura hasta un punto óptimo; luego de esto, el calor almacenado se transfiere al aire de entrada que ingresa al quemador. A través de esta técnica, el quemador regenerativo puede ahorrar el combustible necesario para calentar el aire de proceso, mejorando la eficiencia de combustión.

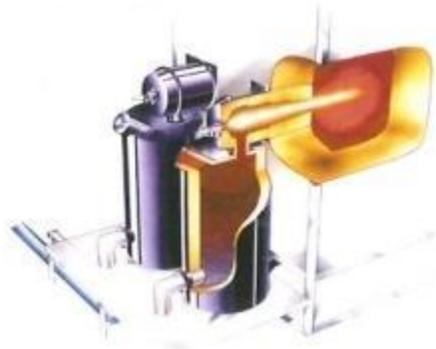


Figura. Quemador regenerativo convencional. Fuente: Hotwork Combustion Technology.

En cuanto a un quemador recuperativo, este consiste en un quemador con superficies de intercambio de calor como parte de su diseño, que capturan la energía del gas de escape de alta temperatura que pasa a través del cuerpo del quemador. El quemador utiliza la energía del gas residual para precalentar el aire de combustión antes de que se mezcle con el combustible. Los quemadores consisten en un intercambiador de calor interno con varias características como ranuras, flujo de contracorriente y aletas, que se utilizan para establecer contacto térmico entre los gases de escape y el aire que proviene del tubo de suministro, y el cual permite de igual manera que en el caso anterior, reducir el consumo energético asociado al calentamiento del aire de proceso.

Por otra parte, se encuentran los economizadores o intercambiadores de calor de tubo aleteado que recuperan calor residual con el fin de aumentar la temperatura de líquidos. El sistema consiste

en tubos cubiertos por aletas metálicas que maximizan la superficie de absorción de calor y la tasa de transferencia de calor, y el cual se sitúa en el conducto que lleva los gases de escape salientes del proceso térmico, absorbiendo y transfiriendo energía térmica al líquido que pasa a través de los tubos. Los economizadores recuperan el calor residual y mejoran la eficiencia de un sistema mediante el precalentamiento de un fluido en particular, como puede ser el agua de alimentación en un generador de vapor o una caldera.

También, se encuentran las calderas de calor residual, las cuales consisten en un sistema constituido por varios tubos por los cuales ingresa el agua y los que se colocan en paralelo entre sí y en la dirección del calor que sale del sistema. El sistema es adecuado para recuperar el calor de los gases de escape de temperatura media – alta con el fin de generar vapor de proceso, el que puede utilizarse para la generación de electricidad o dirigirse a otro proceso que requiere de energía térmica. La presión y la tasa de producción de vapor dependen fundamentalmente de la temperatura del calor residual. Si esta temperatura no es suficiente para que el sistema produzca la cantidad de vapor requerida, existe la opción de añadir al sistema una unidad de quemador auxiliar (Jouhara et al, 2018).

Así como se han mencionado estas tecnologías de recuperación, existen otras cuantas que permiten maximizar la eficiencia energética mediante la reutilización de gases de combustión, reduciendo los costos operativos asociados al consumo de combustible. Debido a las múltiples ventajas que trae consigo la reutilización de calor, es que se recomienda implementar un sistema de recuperación de energía térmica dentro del proceso de fusión-conversión.

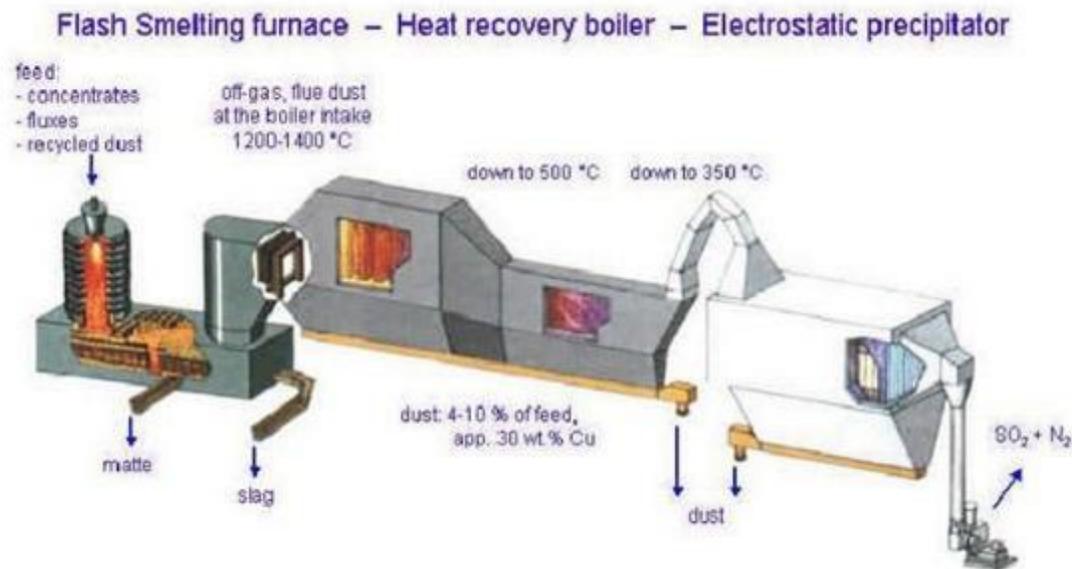


Figura. Recuperación de calor en horno flash. Fuente: Semantic Scholar.

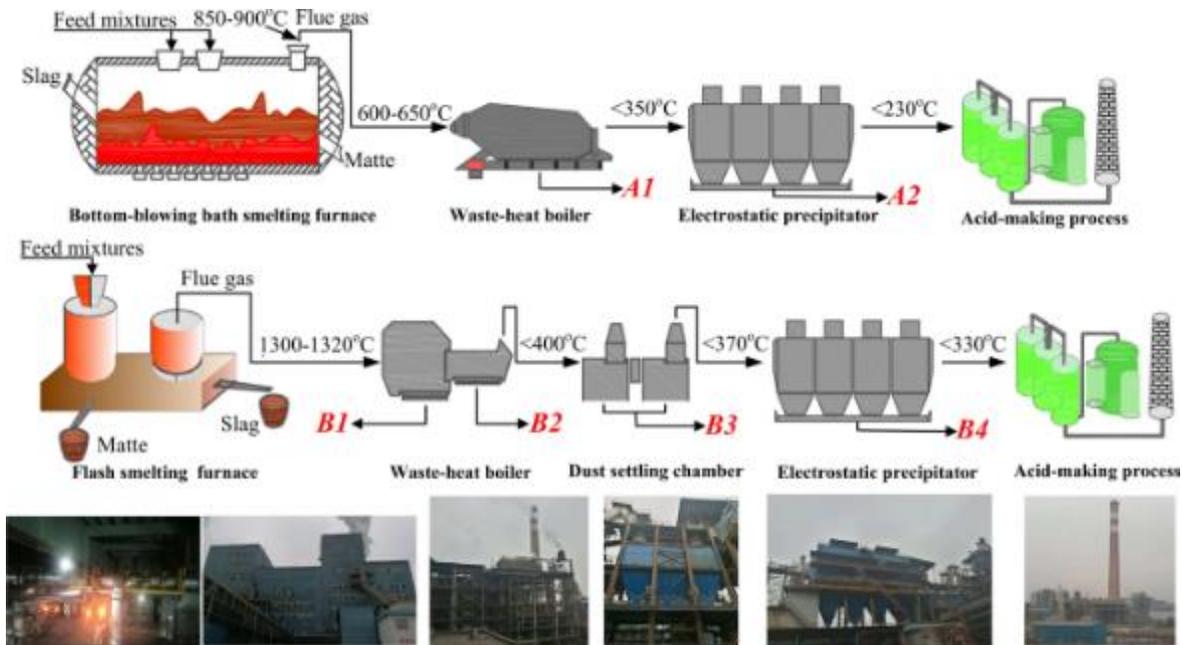


Figura. Recuperación de calor (Waste-heat boiler). Fuente: Springerlink.

5.3.6.5 Implementación de tecnología de Conversión Flash. M11.5

Medida de diseño

Medida térmica

La tecnología de Conversión Flash forma parte del proceso continuo fusión-conversión dentro de la línea patentada por Outotec. En este proceso la mata de grano fino se oxida y funde de manera instantánea, bajo el mismo método que en el proceso de fusión Flash, obteniéndose cobre blíster de 98-99% de pureza, escoria y gases metalúrgicos con altos contenidos de SO₂ (35%-45%) a una temperatura que puede llegar a los 1.450°C (Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006).

Las ventajas de este proceso continuo en comparación con un proceso de conversión discontinuo se presentan a continuación (Kojo, Lahtinen, & Miettinen, 2009):

1. Flujo de gas continuo y reducido.
 - a. Menos enfriamiento y limpieza de gas.
 - b. Menores costos de inversión en la planta de ácido.
 - c. Facilidad de control de gases fugitivos.
 - d. Alta concentración de SO₂ en el gas residual.
2. Proceso sellado.
 - a. Menos emisiones de SO₂.
 - b. Menores costos de inversión en el manejo de gases fugitivos.
 - c. Mejores condiciones de trabajo.
3. Alta capacidad, tamaño reducido, una sola unidad.
 - a. Menos mantenimiento.
 - b. Menores costos de inversión.

4. Proceso continuo.
 - a. Mejor control de procesos.
 - b. Más sencillo de manejar.

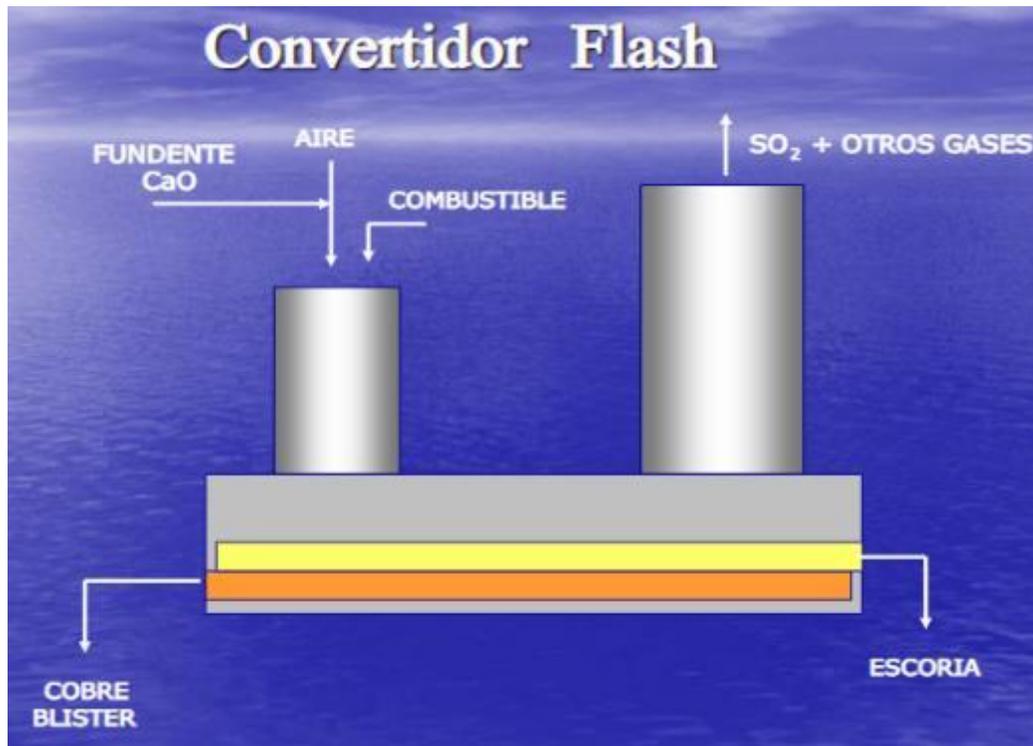


Figura. Esquema Convertidor Flash. Fuente: Fredes, A, Metalurgia extractiva del cobre, <https://slideplayer.es/slide/3513200/>.

5.3.6.6 Correcta relación de aire/combustible. M11.6

Medida operacional

Medida térmica

Todo horno cuyo funcionamiento se basa en la combustión de un combustible tiene una relación aire-combustible especificada, relación que, en el caso de no ser la óptima, implicará una disminución en la eficiencia del horno. Un déficit de aire en efecto causará que el combustible no se queme completamente, lo cual trae consigo una disminución de la temperatura esperada. Dicho efecto también se produce cuando hay un exceso de aire, ya que, si sólo una parte del aire participa en la reacción de combustión, el exceso de aire hará descender la temperatura de la llama adiabática al calentarse en la reacción sin contribuir a la liberación de calor. Por esta razón, es fundamental asegurarse de que el equipo funcione con la mezcla correcta de aire-combustible. El control a través de un análisis regular o continuo del uso real de combustible, del aire de combustión y de los niveles de oxígeno (en exceso) es esencial para mantener las condiciones óptimas de combustión.

A modo de ejemplo, las fundiciones de Harrison Steel en Attica (Indiana), operaban con quemadores anticuados que usaban una mezcla no óptima de aire. Los costos anuales de energía después de la mejora de los quemadores disminuyeron en 74.000 dólares. Por otra parte, el retorno de la inversión se logró en menos de tres meses (Energy Star, 2016).

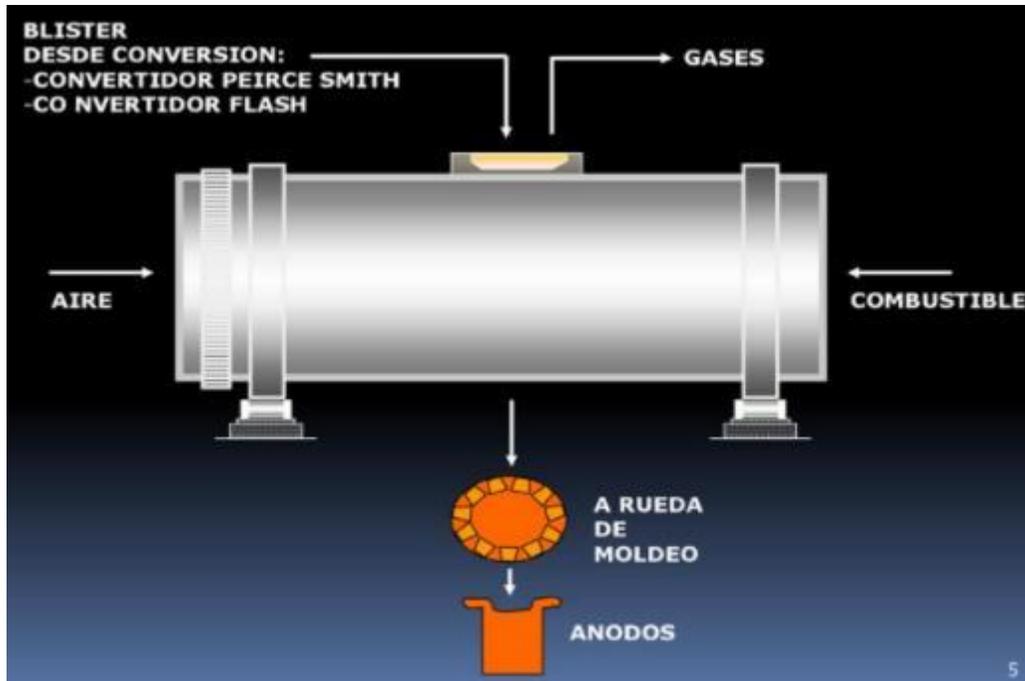


Figura. Influencia aire y combustible en convertidores. Fuente: Pasten, M, Pirometalurgia del cobre, <https://slideplayer.es/slide/14304265/>

5.3.6.7 Mejora de aislamiento térmico de hornos. M11.7

Medida operacional

Medida térmica

La minimización de las pérdidas de calor asociadas a la radiación y la conducción reduce substancialmente el uso de energía. Esto se consigue cerrando el horno con una tapa, eligiendo refractarios modernos adecuados y aislando los materiales. Los refractarios están en contacto con la masa fundida y tienen que ser capaces de soportar el peso del metal y el ambiente abrasivo, corrosivo y caliente. Los refractarios no deben contaminar la masa fundida y deben conservar el calor.

Además de la capa refractaria, los hornos están equipados con capas de material aislante. Este no está en contacto directo con la masa fundida, ya que su propósito es minimizar las pérdidas de calor. La propiedad fundamental de un aislante se asocia a una baja capacidad térmica, es decir, baja conductividad térmica, densidad y capacidad de almacenamiento térmico, para minimizar eficazmente las pérdidas de calor a través de las paredes del horno.

Ejemplos de materiales de baja capacidad térmica son los refractarios de fibra cerámica, y los aislamientos de sílice microporosa. Los materiales súper aislantes como la sílice microporosa aumentan los costos del revestimiento, pero permiten reducir las pérdidas energéticas. En general, los beneficios dependen en gran medida de las condiciones operativas específicas, por ejemplo, la capacidad del horno, el tiempo de fusión y la temperatura, pero también del costo y la vida útil del refractario (Energy Star, 2016).



Figura. Aislamiento térmico en horno. Fuente: Procoen.

5.3.6.8 Utilización de cubiertas para evitar pérdidas térmicas. M11.8

Medida operacional

Medida térmica

Las pérdidas térmicas por radiación y convección provocan un rápido descenso de la temperatura, como en el caso de los hornos de conservación no equipados con cubiertas, corredores, lavanderías y pozos de carga. Los corredores y las lavanderías son canales de transporte de metal líquido. En estos medios de transporte, la pérdida de calor es por radiación, la cual puede ser controlada mediante la utilización de cubiertas. En promedio, la temperatura desciende 2°C por pie a lo largo de las lavanderías descubiertas. Para reducir la pérdida de calor a 1°C por pie, la lavandería debe estar cubierta con un revestimiento de hormigón o cemento refractario. Esta medida requiere de baja inversión y reduce el consumo de energía en el horno, ya que requiere menos sobrecalentamiento. Cabe señalar que el ahorro de energía dependerá en gran medida de la temperatura del metal, el flujo másico y la geometría del canal.

Las pérdidas de calor en los pozos de carga descubiertos también son significativas, perdiéndose 1 kWh por cada metro cuadrado de superficie descubierta. Cubrir las superficies de metal líquido expuestas a la atmósfera limitará las pérdidas de calor y reducirá la formación de escoria. También se producen importantes pérdidas de calor en los hornos de retención, ya que a menudo se dejan sin cubiertas o parcialmente descubiertos para facilitar la carga. En una de las investigaciones vinculadas a este tema, se demostró que las pérdidas de calor son de dos a tres veces mayor en los hornos de retención sin cubierta. Para una temperatura de retención de 1.100°F, un horno eléctrico descubierto consumió 143 kWh. Un horno cubierto a la misma temperatura consumió 55 kWh mientras mantenía el mismo nivel de metal. A una temperatura más alta, 1.400°F, el horno descubierto consumió 266 kWh mientras que el horno cubierto 94 kWh (Energy Star, 2016).



Figura. Proceso de fundición. Fuente: Camiper.

5.3.7 Proyectos Implementados

<p>Control del Factor de Potencia</p> <p>Variador de frecuencia para planta de secado de Concentrado.</p> <p>DIVISION SALVADOR-CODELCO</p>	<p>Medida:</p> <p>El factor de potencia en subestación (SE) Mineros y SE Cordillera no era óptimo, por lo que definió incorporar un Banco de condensadores en la Sub Estación Mineros (35 MVAR) y otro en la Sub Estación Cordillera (30 MVAR). Además, se utilizó un motor sincrónico para generar energía reactiva.</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>
<p>Cambio de quemadores de combustible en Horno Basculante por Oxígeno.</p> <p>VENTANAS -CODELCO</p>	<p>Medida:</p> <p>El gas enriquecido con oxígeno es más económico (por mayor eficiencia) que el combustible diésel, por lo cual se procedió a realizar el remplazo de quemadores de petróleo por quemadores de oxígeno-gas, en los hornos basculantes de la División Ventanas de Codelco.</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>
<p>Recambio de Horno de fusión laboratorio químico</p> <p>Compañía Minera Candelaria</p> <p>LUNDIN MINING</p>	<p>Recambio de Horno de fusión laboratorio químico para la cuantificación de leyes de concentrados</p> <p>Ahorro estimado</p> <p>Electricidad: 15%</p>	<p>Fuente: información suministrada por la propia empresa para esta publicación</p>

<p>Pre-secado de minerales</p> <p>Mina Iluca</p> <p>Canberra</p> <p>Australia</p>	<p>El sistema de separación de minerales utiliza un proceso de separación electrostática que requiere que los minerales estén completamente secos para el secado realizado por los secadores de gas. Considerando que cuanto más húmeda sea la corriente de entrada, más energía se requiere para la operación de secado en las operaciones, entonces dentro de la empresa se desarrolló una evaluación de todo el sistema de separación de minerales y se identificó que los procesos en las etapas de presecado podrían modificarse para reducir al mínimo el contenido de agua del material que entraba en los secadores, a pesar de que ello requería un mayor aporte de energía en el secado, el resultado general fue un ahorro de 30.800 GJ de energía - y 164.000 dólares - por año para todo el proceso, con un período de recuperación de la inversión de menos de 2 años.</p>	<p>Fuente: Hargroves, K., Gockowiak, K., McKeague, F., and Desha, C. (2014) An Overview of Energy Efficiency Opportunities in Mining and Metallurgy Engineering, The University of Adelaide and Queensland University of Technology (The Natural Edge Project), commissioned by the Australian Government Department of Industry, Canberra.</p> <p>https://cms.qut.edu.au/_data/assets/pdf_file/0004/533065/flat-pack8-an-overview-of-energy-efficiency-opportunities-in-mining-and-metallurgy-engineering.pdf</p>
------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

5.4 Electrorrefinación. Línea Pirometalúrgica

5.4.1 Descripción

El proceso de electrorrefinación consiste en la disolución electroquímica de ánodos de cobre procedentes de la etapa de fundición. Este, se realiza en celdas electrolíticas donde se ubican ánodos y cátodos alternadamente sobre una solución denominada electrolito, y en las cuales se aplica una corriente eléctrica continua que permite refinar el cobre anódico, permitiendo así la obtención de cátodos de cobre de alta pureza (99,99%).

Los objetivos de la electrorrefinación son dos:

1. Eliminar impurezas que interfieren en las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre
2. Segregar las impurezas valiosas del cobre (subproductos metálicos)



Ilustración 24. Planta de electrorrefinación. Fuente: [39]

5.4.2 Caracterización Energética

Dentro del proceso de electrorrefinación, 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. Dentro de este proceso, el consumo eléctrico puede alcanzar los 850 kWh por tonelada de cátodo de cobre.

Por otro lado, se encuentra el consumo de energía térmica asociada al uso de calentadores de agua, los que corresponden a equipos térmicos que operan en base a combustible o electricidad. Dichos equipos tienen el fin de suministrar agua a una temperatura que puede oscilar entre los 55°C y los 70°C.

Otros consumos de energía están asociados al uso de bombas de impulsión empleadas para el transporte de agua y bombas de alimentación de combustible.

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/m^2K].

Respecto a la instalación del aislamiento, en esta se debe asegurar una 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 [40].

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% [41].



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 [42].

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]

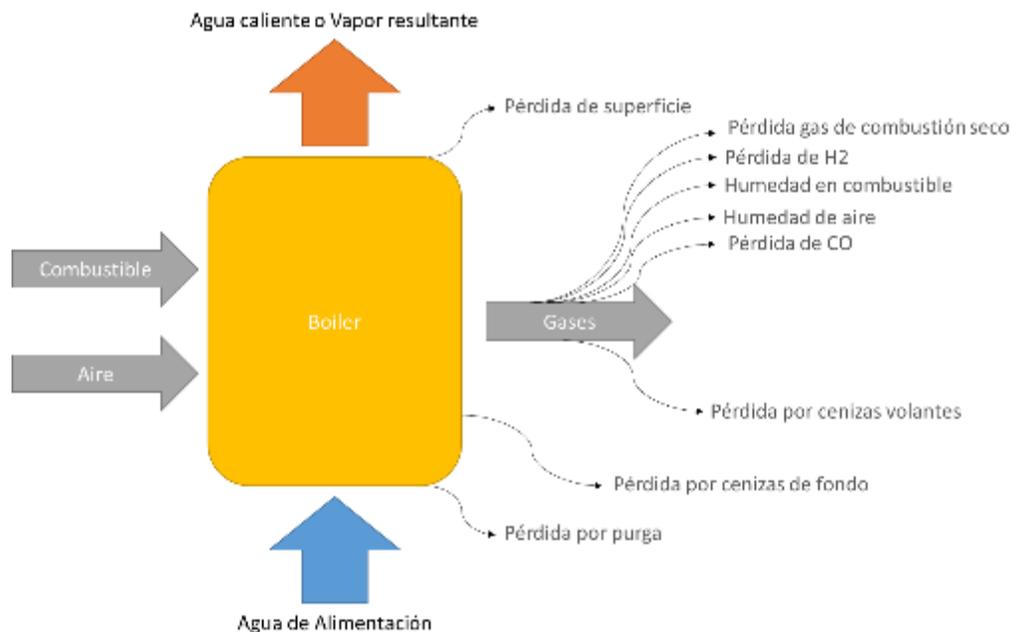
h_a es la entalpía específica del flujo de agua de alimentación [kcal/kg]

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 9. Exceso de aire recomendado para la combustión de diferentes combustibles. Fuente: [41]

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 [41].

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 temperatura baja en el bunker o una falta de presión de inyección reducen la eficiencia de combustión.	Sistema de acondicionamiento de combustible y 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, válvulas, regulares de presión, manómetros, termómetros, etc. 3. Identificar las áreas donde se encuentran los equipos consumidores de calor, además de ubicar la línea de retorno de condensados. 	Sistema de generación de vapor / Sistema de distribución de vapor/ Sistema consumidor
2	Llevar a cabo recorridos de inspección mediante: <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	En función de los resultados de la inspección, las reparaciones deberán programarse en función de: <ol style="list-style-type: none"> 1. La ubicación de la fuga, 	Departamento de mantenimiento

N°	Actividad	Sitio
	2. La complejidad de la fuga, 3. El tipo de operación. No es recomendable por ningún motivo reparar cuando el proceso se encuentre en operación, debido a que esto puede causar altos riesgos laborales.	
4	Reparar las fugas llevando a cabo: <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 [41].

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

N°	Descripción de medida de ahorro energético	Ahorro de Combustible %		
		Mínimo	Máximo	Promedio
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 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.

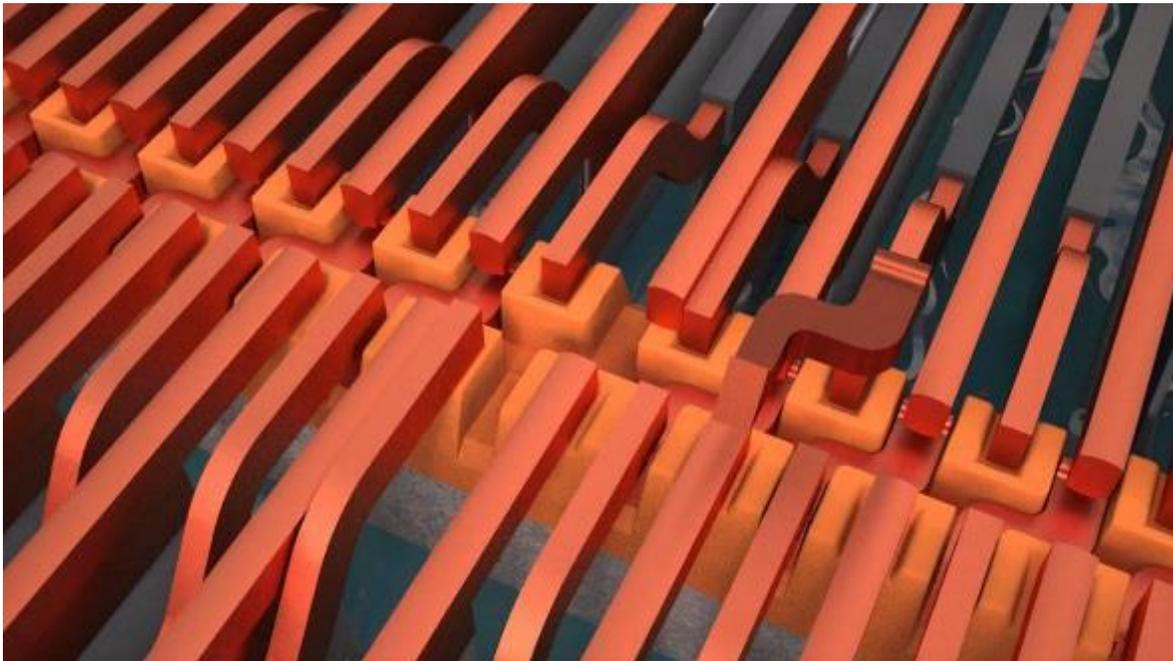


Figura: Interceldas Optibar. Fuente: Tec-Q

5.4.3.7 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 disiparse 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).

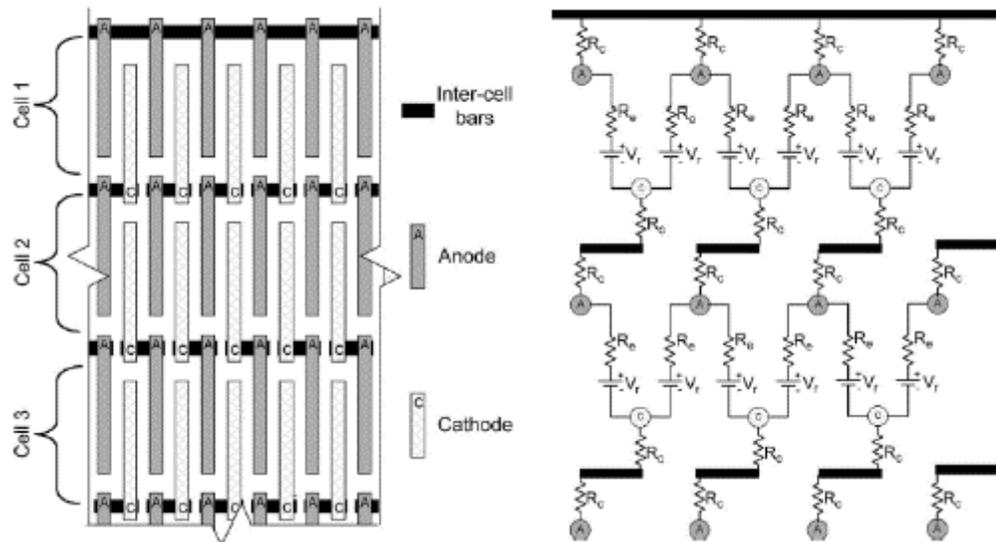


Figura. Configuración empleando tecnología intercelda. Fuente: (Aqueveque & Wiechmann, 2009)

5.4.3.8 Información y recomendaciones generales asociadas a proceso ER. M12.1

Medida operacional

Medida eléctrica

El nivel de producción y eficiencia energética de los procesos de electrorrefinación de cobre están determinados por:

- 1) La eficiencia de corriente de las celdas electrolíticas
- 2) Las pérdidas de energía producidas en las resistencias eléctricas de los componentes del proceso.

La eficiencia de corriente en las celdas de ER de cobre, al igual que en EW, 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 ER 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 electrolítica 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 ER 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. Proceso de fundición. Fuente: Metexplotcu.

5.4.3.9 Medidas Preventivas de Pérdidas de Corriente por Fuga a Tierra. M12.2

Medida operacional

Medida eléctrica

El fenómeno de fuga de corriente se produce por el contacto a tierra de un electrolito derramado. Para minimizar las pérdidas asociadas a dicho fenómeno, se recomienda realizar una aislación adecuada y un mantenimiento óptimo de la celda de electro-refinación.

En cualquier instalación eléctrica, algo de corriente fluirá a la tierra a través del conductor de protección de tierra. Esto normalmente se denomina corriente de fuga. La tecnología en aislantes en los últimos treinta años ha producido materiales, como los termoplásticos o las resinas epóxicas, cuyo valor de resistencia de aislación para el material nuevo supera con facilidad los 1.000 MΩ, de modo que al encontrar un equipo o conductor con valores de resistencia de aislación como los

mínimos sugeridos, aun siendo aceptable y no esperándose de él problemas inmediatos, se debe pensar que en ese aislante existe ya un proceso de envejecimiento más o menos avanzado. Para determinar la mayor o menor gravedad de este envejecimiento se debería conocer como ha sido su evolución en el tiempo, vale decir debería contarse con una serie significativa de mediciones periódicas que permitieran establecer una curva de envejecimiento de la aislación y en función a la pendiente de esta curva determinar la mayor o menor rapidez con que éste se ha producido y de acuerdo con esto se podría estimar el comportamiento futuro de ese aislante.



Figura. Medición de fugas de corriente a través de itinerarios a tierra involuntarios. Fuente: Blog Certicalia

Más información:

https://www.sec.cl/sitioweb/electricidad_norma4/norma4_completa.pdf

<https://www.certicalia.com/blog/como-medir-fugas-de-corriente>

5.4.4 Proyectos Implementados

<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 su 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 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].]
- [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 Rumbo Minero, «Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino,» [En] 3] línea]. Available: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>. [Último acceso: 2020].
- [1 «Minería Chilena,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-4-especifico-de-energia/#>. [Último acceso: 2020].]
- [1 R. Sabbagh, «Theoretical and Experimental Investigation of Hydrocyclone Performance and the] 5] Influence of Underflow Pumping Effect,» 2015.

- [1 K. Shah, «Construction, Working and Maintance of Crusher for Crushing Bulk Materials,» 2018. 6]
- [1 Greg Adel, Toni Kojovic y Darren Thornton, «Mine-to-Mill Optimization of Aggregate 7] Production,» 2006.
- [1 M. Moncada Merino, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio de harnero 8] vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos,» Concepción, 2017.
- [1 D. Escobar Moscoso, «Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero 9] vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos,» 2016.
- [2 J. Saavedra Vidal, «Control de presión de agua mediante variador de frecuencia y motobomba,» 0] 2007.
- [2 Electro Industria, 2017. [En línea]. Available: 1] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&ni=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vgf>. [Último acceso: 2020].
- [2 Vibra Screener, 2016. [En línea]. Available: [https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2\] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/](https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/).
- [2 Minería Chilena, «Sensores de vanguardia para optimizar la flotación de concentrados,» [En 3] línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/highservice-sensoflot-sensores-vanguardia-optimizar-la-flotacion-concentrados/>. [Último acceso: 2020].
- [2 Gaines, Energy and Materials Flow in the Copper Industry, 1980. 4]
- [2 Ministerio de Energía y Minas, «Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de 5] diagnóstico energético,» Perú.
- [2 Portal Minero, «Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras II,» Portal Minero Ediciones, Chile. 6]
- [2 Universidad de Chile, «Separación sólido - líquido,» Santiago de Chile. 7]
- [2 G. Aravena, «Slide Share,» [En línea]. Available: 8] <https://es.slideshare.net/GabrielAravena/167573358-espesamientoyfiltrado>. [Último acceso: 2020].
- [2 Federación Minera, «Antofagasta Minerals definiría sus inversiones el 2017,» [En línea]. 9] Available: <http://www.federacionminera.cl/antofagasta-minerals-definiria-sus-inversiones-el-2017/>. [Último acceso: 2020].

- [3 G. Riveros, «Fundamentos de Metalurgia Extractiva,» 2010.
0]
- [3 Metso, «Horno térmico Grate Kiln Indurating Machine,» [En línea]. Available:
1] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1294367.html>. [Último
acceso: 2020].
- [3 U.S. Department of Energy, «An assessment of energy requirements in proven and new copper
2] processes,» University of Utah, 1980.
- [3 Consejo Minero, «Buenas Prácticas: Tostación en lecho fluidizado,» [En línea]. Available:
3] <https://i.ytimg.com/vi/8LCdB8sYqOg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [3 Comisión Chilena del Cobre, «Tecnología en fundiciones de cobre,» Chile, 2015.
4]
- [3 Minería Chilena, «Fundiciones de cobre en Chile,» [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/wp-
5\] content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg](https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg). [Último acceso: 2020].
- [3 G. Riveros, «Pirometalurgia,» Universidad de Chile, 2009.
6]
- [3 Nueva Minería y Energía, «Fundición de Concentrados de Chuquicamata lleva adelante cinco
7] proyectos de mejora,» [En línea]. Available: [https://www.nuevamineria.com/revista/fundicion-
de-concentrados-de-chuquicamata-lleva-adelante-cinco-proyectos-de-mejora/](https://www.nuevamineria.com/revista/fundicion-de-concentrados-de-chuquicamata-lleva-adelante-cinco-proyectos-de-mejora/). [Último
acceso: 2020].
- [3 Britannica, «Roasting, smelting, and converting,» [En línea]. Available:
8] [https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-
converting](https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-converting). [Último acceso: 2020].
- [3 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](https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2014/05/earless-1-ok-620x403.jpg). [Último acceso: 2020].
- [4 Fenercom, «Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial,» 2017.
0]
- [4 USAID, «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor,» 2011.
1]
- [4 Agencia de Sostenibilidad Energética, «Guía para calificación de consultores en Eficiencia
2] Energética,» 2011.
- [4 C. Karpuz, «Energy Efficiency of Drilling Operations,» 2017.
3]

- [4 «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].
- [4 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].
- [4 «Mining And Construction,» [En línea]. Available:
6] <https://miningandconstruction.com/mining/undergroundmining/efficiency-as-strong-as-iron-2607/>. [Último acceso: 2020].
- [4 The Warren Centre, «Zero Emission Copper Mine of the Future,» 2020.
7]
- [4 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.
- [4 «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].
- [5 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.
- [5 J. Ortiz, «Apuntes de Curso de Explotación de Minas,» Santiago de Chile.
1]
- [5 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].
- [5 INACAP, «Extracción Mina».
3]
- [5 Ferrostaal, «Ferrostaal,» [En línea]. Available: [https://www.ferrostaal.com/es/referencias-4\] ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/](https://www.ferrostaal.com/es/referencias-4] ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/). [Último acceso: 2020].
- [5 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.
- [5 R. Castro, «Sistemas de Extracción Vertical,» Santiago de Chile.
6]
- [5 Jack de la Vergne, «Diccionario Técnico de Mineros y Petroleros,» 2012.
7]

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

[5 Codelco, «Lixiviación,» Chile, 2019.
9]

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

[6 B. Valenzuela, «Balance Térmico de Soluciones Asociadas al Circuito SX-EW,» 2012.
1]

[6 Metso, «Chancador Giratorio Primario,» [En línea]. Available:
2] <https://www.metso.com/es/productos/chancadores/chancadores-giratorios-primarias/chancador-giratorio-primario-superior/chancador-giratorio-primario-superior-60-110e/>. [Último acceso: 2020].

[6 SPD, «Minera Tres Valles recibe fondo de Anglo American para impulsar proyectos,» [En línea].
3] Available: <https://southpacificdrilling.com/minera-tres-valles-recibe-fondos-de-anglo-american-para-impulsar-proyectos/>. [Último acceso: 2020].

[6 Minería Chilena, «Características de plantas SX pequeñas y medianas,» [En línea]. Available:
4] <https://www.mch.cl/reportajes/caracteristicas-de-plantas-sx-pequenas-y-medianas/#>. [Último acceso: 2020].

[6 Camiper, «Metalurgia: ¿Qué es la electroobtención y para qué sirve?,» 2019. [En línea].
5] Available: <https://camiper.com/temppominero/wp-content/uploads/2019/10/metalurgia-electroobtencion.jpg>. [Último acceso: 2020].

[6 Singh, «New trends in drilling and blasting technology,» *International Journal of Surface Mining,
6] Reclamation and Environment*, pp. 305-315, 2000.

[6 Babaei Khorzoughi Mohammad y Hall Robert, «Processing of measurement while drilling data
7] for rock mass,» *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.

[6 G. N. Moraga Hidalgo, «Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la
8] tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto,» Concepción, Chile,
2018.

[6 Ingeopres, «Perforación y Voladuras,» España, 2011.
9]

[7 J. Bernaola, J. Castilla y J. Herrera, «Perforación y voladura de rocas en minería,» Departamento
0] 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:*
1] *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 2] 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: a review with emphasis on the role of 3] 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 4] chileno,» Santiago de Chile, 2017.
- [7 R. Solorzano, «Caterpillar impacta con su excavadora híbrida,» 2016. [En línea]. Available: 5] <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886621/caterpillar-impacta-con-su-excavadora-hbrida#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20h%C3%ADbrida%20es%20sin%C3%B3nimo,combusti%C3%B3n%20suplementado%20por%20potencia%20el%C3%A9ctrica.&text=Aug%20>
- [7 «Revista Maquinaria Pesada,» 2013. [En línea]. Available: 6] <http://revistamakinariapesada.com/caterpillar-entrego-su-primera-excavadora-hibrida-en-bauma-2013/>. [Último acceso: 2020].
- [7 E. Cornejo, «Sistema de optimización de transporte para la mediana minería,» Chile, 2013. 7]
- [7 A. Moradi Afrapoli y H. Askari-Nasab, «Mining fleet management systems: a review of models 8] and algorithms,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017.
- [7 Minería Chilena, «El caso de Trolley Assist,» 2012. [En línea]. Available: 9] <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-0\] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#](https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-0] 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 1] mining,» 2019.
- [8 Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi y Seyed Farhad Moosakazemi, 2] «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 3] and conveying, and truck/shovel systems,» 2017.
- [8 J. Tonge, «The implications of improved conveyor technology on In-Pit Crusher Conveyor 4] Systems,» 2017.
- [8 W. Loli Morales, «Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de 5] un pit crusher and conveyors,» Santiago de Chile, 2016.

[8 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-6-innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/>.

[8 M. Acuña Reyes y A. Arancibia Reyes, «Patentscope,» 2013. [En línea]. Available: <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2013049953>.

[8 Minería Chilena, «Innovador proyecto permite a Radomiro Tomic ahorrar hasta 80% en uso de agua,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/2018/07/17/innovador-proyecto-permite-a-radomiro-tomic-ahorrar-hasta-80-en-uso-de-agua/>.

[8 Expande, «Casos de innovación de proveedores en la minería chilena,» 2018.

9]