



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería

DE /012/2014

Resumen Ejecutivo

Anualmente la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) publica indicadores de intensidad de uso de energía por procesos. En complemento a lo anterior, este informe tiene por objeto proponer una familia nueva de “indicadores de intensidad de uso de energía por procesos de la minería del cobre corregidos por variables estructurales”. Estos indicadores permitirán medir la eficiencia energética alcanzada en el sector utilizando la mejor información disponible para este efecto. Además, es importante mencionar que este trabajo se transformará en una línea de trabajo permanente y adicional a los actuales indicadores de intensidad de uso de energía publicados por Cochilco.

La metodología empleada se divide en dos partes. Primero, se definieron indicadores de intensidad de uso de energía los cuales fueron corregidos por variables estructurales, focalizados en aquellos procesos o subprocesos relevantes en el consumo de energía. Segundo, se recopiló información de producción y consumo de energía en diferentes faenas mineras de cobre requeridos para la construcción de nuevos indicadores en el periodo 2007 - 2013.

Los indicadores propuestos no corresponden a una corrección lineal entre éstos y los indicadores actuales de intensidad de uso de energía publicados por Cochilco. En este sentido, las variables seleccionadas para la construcción de cada nuevo indicador independiza las variaciones del consumo energético causado por las variables exógenas involucradas en el proceso o subproceso.

Los principales resultados del estudio son los siguientes:

a) Proceso de Mina Rajo

- Se propone dos nuevos indicadores de intensidad de uso de energía en el proceso de Mina Rajo, específicamente en los subprocesos de Transporte y Chancado Primario, ya que el primero es representativo del consumo total de combustible, mientras que el segundo es representativo del consumo de electricidad.
- El nuevo indicador de Transporte considera las variables de combustible utilizado por camiones, material total movido y distancias de acarreo. Este indicador posee una variación de un 3,7% en el periodo 2007 – 2013.
- El indicador de Chancado Primario considera el consumo de electricidad en el subproceso de chancado primario y el mineral total procesado en este



subproceso. Este indicador tiene una variación de un -25,6% en el periodo 2007 - 2013.

b) Mina Subterránea

- Se propone un nuevo indicador solo para el caso de consumo de energía eléctrica.
- El nuevo indicador considera solo el consumo eléctrico que depende directamente de la extracción de mineral y excluye la ventilación mina. Este nuevo indicador tiene un variación de un 27,7% en el periodo 2007 – 2013.

c) Planta Concentradora

- Indicador propuesto mide la intensidad de uso de electricidad por unidad de mineral tratado que representa más del 95% del consumo total tal de energía en la Planta Concentradora.
- El indicador propuesto no considera el consumo de electricidad incurrido por las plantas de molibdeno de la planta Concentradora ni el cobre fino como unidad física que es dependiente de la ley del mineral tratado.
- La variación del nuevo indicador corregido en la Planta concentradora es de 5,4% en el periodo 2007 – 2013.

d) Planta LXSXEW

- Indicador propuesto mide la intensidad de uso de electricidad ya que este tipo de energía representa más del 80% del consumo total en este proceso.
- Se propuso inicialmente para la construcción de nuevos indicadores en los subprocesos de Lixiviación y extracción por solventes-electroobtención (SXEW). Sin embargo, solo es posible construir con la información disponible y de manera insesgada el indicador de intensidad de uso de electricidad en el proceso SXEW.
- El nuevo indicador utiliza como unidad física el tonelaje de cátodos electro obtenidos para la medición de intensidad de uso en SXEW. Este nuevo indicador tiene una variación de un -6.5% en el periodo 2007 - 2013.

En la tabla 1 se muestran en forma comparativa los indicadores de intensidad de uso actuales y los corregidos y las variaciones registradas entre el año base 2007 y el año 2013.



Tabla 1: Resumen de variación de indicadores actuales y corregidos por proceso en 2007/2013

Proceso	Indicador de intensidad de uso (actual)	Variación indicador actual 2007 - 2013	Indicador de intensidad de uso (corregido)	Variación indicador corregido 2007 - 2013
Mina Rajo	$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton mineral extraído}}$	+17,3%	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte $\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton material movido x Km eq.}}$	+3,7%
	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton mineral extraído}}$	-12,5%	<ul style="list-style-type: none"> • Chancado primario $\frac{\text{Energía eléctrica en Chancado}}{\text{Ton. mineral chancado}}$	-25,6%
Mina Subterránea	$\frac{\text{Energía eléctricas}}{\text{Ton. Mineral extraído}}$	+39,5%	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Mineral extraído}}$ (No se considera el consumo de energía debido a ventilación de túneles)	+27,7%
Concentradora	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton mineral tratada}}$	+3,7%	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton mineral tratado}}$ (No considera consumo de plantas de molibdeno)	+5,4%
LXSXEW	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton Cu fino en cátodos EO}}$	-2,5%	<ul style="list-style-type: none"> • SxEw $\frac{\text{Ener. eléctrica SxEw}}{\text{Ton Cu fino en cátodos EO}}$	-6,5%

Fuente: Elaboración propia, Cochilco, 2014.



Contenido

Resumen Ejecutivo	1
1. Introducción.....	7
2. Marco conceptual.....	8
2.1 Glosario	8
2.2 Concepto de Eficiencia Energética.....	10
2.3 Indicadores de intensidad de uso para medir eficiencia energética	11
2.4 Nivel de desagregación de los datos.....	12
3. Metodología.....	15
3.1 Construcción de indicadores.....	15
3.2 Recopilación de información y utilización de datos	16
4. Propuesta de indicadores corregidos	18
4.1 Indicador Mina Rajo	18
4.2 Indicador Mina Subterránea	21
4.3 Indicador Planta Concentradora	23
4.4 Indicador LXSXEW	25
4.4 Indicador Fundición.....	27
4.5 Indicador Refinería	29
5. Resultados de Indicadores de Eficiencia Energética	32
5.1 Resultado indicador Mina Rajo	33
5.2 Resultado indicador Mina Subterránea	36
5.3 Resultado indicador Planta Concentradora	37
5.4 Resultado de indicadores de lixiviación, extracción por solventes y electroobtención.....	38
7. Conclusiones	41
8. Referencias	42
9. Anexo A.....	43
10. Anexo B.....	51



Índice de figuras

Figura 1: Pirámide de indicadores de consumo energéticos según información disponible	13
Figura 2: Consumo unitario de combustibles por mineral extraído – Mina rajo (Kwh/Ton mineral extraído)	19
Figura 3: Consumo unitario de electricidad por mineral extraído – Mina subterránea (Kwh/Ton mineral extraído).....	21
Figura 4: Consumo unitario de electricidad por mineral procesado – Planta Concentradora (Kwh/Ton mineral procesado)	23
Figura 5: Consumo unitario de electricidad por mineral extraído y cobre fino producido – LXSXEW (Kwh/Ton mineral lixiviado – Kwh/TMF Cu)	26
Figura 6: Consumo unitario de energía por cantidad concentrados procesado – Fundición (Kwh/Ton concentrado procesado)	28
Figura 7: Consumo unitario de energía por cantidad ánodos a fuego procesados – Refinería (Kwh/Ton concentrado procesado)	30
Figura 8: Indicadores de consumo de combustibles en el transporte de material en Mina Rajo .	33
Figura 9: Variación de indicadores de consumo de combustibles en el transporte de material en Mina Rajo (año base 2007=100 – País)	34
Figura 10: Indicadores de consumo unitario de electricidad en Chancado primario en Mina Rajo	35
Figura 11: Variación de indicadores de consumo de electricidad en Chancador primario en Mina Rajo (año base 2007=100 – País)	35
Figura 12: Indicadores de consumo unitario de electricidad en Mina Subterránea	36
Figura 13: Variación de indicadores de consumo de electricidad en Mina Subterránea (año base 2007=100 – País)	37
Figura 14: Indicadores de consumo de electricidad en planta concentradora	37
Figura 15: Variación de indicadores de consumo de electricidad en planta Concentradora (año base 2007=100 – País).....	38
Figura 16: Indicadores de consumo eléctrico en proceso de recuperación de cobre utilizando hidrometalurgia. (Año base 2007=100 – País)	39
Figura 17: Variación de indicadores de consumo eléctrico en proceso de recuperación de cobre utilizando hidrometalurgia.....	40



Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de variación de indicadores actuales y corregidos por proceso en 2007/2013. 3

Tabla 2: Información adicional solicitada en encuesta EMPAE 2013 17

Tabla 3: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de combustibles en el proceso de extracción Mina Rajo..... 19

Tabla 4: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de extracción Mina Rajo 20

Tabla 5: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de combustibles en el proceso de extracción Mina Subterránea..... 21

Tabla 6: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de extracción Mina Subterránea..... 22

Tabla 7: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en la Planta Concentradora..... 24

Tabla 8: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Planta Concentradora 25

Tabla 9: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de LXSXEW 26

Tabla 10: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de LxSxEw 27

Tabla 11: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de LxSxEw 28

Tabla 12: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Fundición ... 29

Tabla 13: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de Refinación de Cobre 30

Tabla 14: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Refinación.. 31



1. Introducción

Este informe tiene por objetivo desarrollar indicadores de consumo de energía unitarios en la minería del cobre, por procesos, corregidos por variables estructurales que inciden en su intensidad uso. Estos nuevos indicadores propuestos podrán medir la eficiencia energética alcanzada en el sector a través de las variaciones en los consumos unitarios de energía por procesos registrados entre dos periodos.

Hoy en día, no todos los indicadores existentes que muestran la variación en la intensidad de uso de la energía en el sector minero sirven como un instrumento para medir la eficiencia energética de la industria. Esto se debe a que la minería es una industria donde la intensidad de uso de la energía es incremental en el tiempo, debido al deterioro de los yacimientos mineros. Por este motivo, se requiere de la construcción de nuevos indicadores que midan la adecuadamente el sector independientemente de los factores naturales que inciden en el crecimiento del consumo energético.

La Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) en coordinación con la *Mesa Minera de Energía Sustentable*, durante el segundo semestre de 2013, constituyeron un comité técnico cuyo objetivo fue la definición de indicadores de intensidad de uso de energía capaces de capturar la variación del consumo de energía por medidas de eficiencia energética implementadas por la industria minera del cobre.

Los indicadores corregidos, aquí presentados, constituirán una línea de trabajo permanente y complementaria a la publicación de de indicadores de consumo de energía unitarios desarrollados anualmente por Cochilco (*“Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre”*). De esta manera, se podrá realizar un seguimiento temporal del consumo de energía que reflejen la eficiencia energética debido a cambios tecnológicos y/o de gestión dentro de la industria minera.

De manera particular este informe está conformado a través de la siguiente estructura. Primero se presenta el marco conceptual y la metodología utilizada para la construcción de los nuevos indicadores, donde se hará una revisión de qué se entiende por eficiencia energética, las diferentes maneras de medirla y la calidad de los datos de los indicadores. Segundo, se mostrará la propuesta de indicadores de eficiencia energética y su comportamiento con información real recogida desde las empresas mineras en el periodo 2007 – 2013. Por último, el informe finaliza con un punto Conclusiones donde efectúa un resumen de los principales resultados obtenidos durante el estudio.



2. Marco conceptual

2.1 Glosario

Con objeto de precisar algunos de los conceptos empleados en el informe a continuación se incluye un glosario de términos.

2.1.1 *Procesos*

- **Mina Rajo:** es el conjunto de procesos unitarios necesarios para la extracción del mineral (mena) desde una faena minera a rajo abierto para su posterior procesamiento y recuperación del mineral. Algunos de los principales subprocesos son: perforación y tronadura, transporte, carguío, hasta el chancado primario.
- **Mina Subterránea:** Es el conjunto de procesos unitarios necesarios para la extracción de mineral, utilizando cualquier método de explotación subterráneo, para su posterior procesamiento y recuperación del mineral. Algunos de los principales subprocesos considerados son: perforación y tronadura, transporte, carguío, hasta el chancado primario.
- **Concentradora:** Considera todos los procesos unitarios, posteriores al chancado primario, involucrados en la producción de concentrado de cobre. Los principales procesos considerados son: Plantas Chancado, Molienda Tradicional, Molienda S.A.G., Concentración (Flotación), Filtrado, disposición de relaves y recirculación de aguas, entre otros. Excluyendo los subprocesos propios de recuperación de Molibdeno.
- **LXSXEW:** Considera todos los procesos unitarios hidrometalúrgicos involucrados en la producción de cátodos electroobtenidos, posteriores al chancado primario. Los principales subprocesos involucrados son: Aglomeración, Lixiviación ROM, Lixiviación HEAP, Extracción por Solventes y Electroobtención.
- **SXEW:** Considera los procesos unitarios de extracción por solventes y electroobtención. El proceso unitario de lixiviación es excluido.
- **Fundición:** Considera todos los procesos unitarios involucrados en la producción de cobre blíster a partir de concentrados de cobre. Los principales procesos considerados son: Secado, Fusión (hornos), Conversión, Pírorrefinación (refino y moldeo de ánodos).



- **Refinería:** Corresponde al proceso físico de electrólisis con el cual se obtienen cátodos de cobre de alta pureza.
- **Servicios:** Corresponde a aquellas actividades que no se encuentran involucradas en los procesos productivos unitarios de la cadena de valor principal, pero que son necesarias para el desarrollo de la minería y poseen consumo energético de importancia como lo son: consumo energético en talleres, en campamentos, impulsión y desalación de agua, entre otros.

2.1.2 Tipo de Energía

- **Combustibles:** Corresponde al conjunto de combustibles utilizados en la minería para la generación de energía. Los combustibles considerados son: Carbón, Gasolina, Diesel, Enap 6, Kerosene, Gas Licuado, Gas Natural, Leña, Butano, Nafta y Propano. Los datos se entregan en unidades equivalentes de energía considerando el poder calorífico de cada combustible y la tecnología utilizada para su combustión.
- **Electricidad:** Considera la energía eléctrica consumida por la industria minera del cobre desde el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el Sistema Interconectado Central (SIC) y generación propia.

2.1.3 Definición de variables

- **Variable exógena (o estructural):** variable donde la gestión operacional no tiene control o incidencia. Específicamente en el presente informe se reconocen cuatro: i) aumento de distancias de acarreo de material, ii) Aumento de razón estéril-mineral (medida relativa de profundidad), iii) disminución de la leyes de mineral y iv) aumento de la dureza del mineral. Por ejemplo, en mina a rajo abierto las distancias de acarreo es una variable exógena ya que es una consecuencia del envejecimiento del yacimiento.
- **Variable endógena:** variable que la operación puede controlar. Por ejemplo, en la planta concentradora la cantidad de material procesado y el tiempo de residencia del mineral son variables endógenas, ya que pasa por una decisión interna de la operación.
- **Kilómetro Equivalente (Km eq):** corresponde a la suma de las distancias horizontales más la homologación de una distancia en pendiente asociada a una distancia horizontal, para lo cual se utiliza un factor que representa el gasto de los camiones. El factor que acompaña a las distancias en pendientes se calcula de



manera particular en cada faena y depende del ángulo de inclinación de la pendiente, rugosidad del camino, entre otros factores. Esta homologación se puede medir como $Km_{eq} = Km_{horizontal} + Factor \cdot Km_{pendiente}$

2.1.4 Definición de indicadores de intensidad de uso de energía

- **Indicadores Actuales:** Corresponde a los indicadores de intensidad de uso de energía en minería del cobre por proceso publicados por la Comisión Chilena del Cobre, cuya última revisión se encuentra en el informe *ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA ASOCIADO A LA MINERÍA DEL COBRE AL AÑO 2012*, publicado en 2013.
- **Indicadores Corregidos:** Corresponde a los indicadores de intensidad de uso de energía en minería del cobre por procesos, corregidos por variables estructurales de la minería. Las propuestas de estos indicadores corregidos se proponen en el presente informe.

2.2 Concepto de Eficiencia Energética

Se entiende por Eficiencia Energética (EE) como el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos. Consecuentemente, la eficiencia energética se mide a través de indicadores que, a su vez, miden la variación de consumos unitarios de energía en el tiempo.

Se debe tener en consideración que la eficiencia energética se encuentra relacionada con la intensidad de uso de la energía, pero no son equivalentes. De hecho, la intensidad de uso, en términos generales, es entendida como la relación inversa de eficiencia energética; un aumento en la eficiencia energética permite la disminución en el uso de la energía para la obtención de una misma cantidad de producto.

En este sentido, la tarea planteada en el presente informe tiene relación con la construcción de indicadores, representativos y significativos, capaces de medir la eficiencia energética en la industria minera en Chile. Esto, al igual que la construcción de indicadores de cualquier otra industria, no es una tarea trivial; ya sea por la propia definición de indicadores como por el acceso a la información requerida por los mismos.

La mayor dificultad para medir la eficiencia energética es su aislación de otros factores que determinan el consumo de energía. De esta manera, solo es posible de cuantificar las medidas de eficiencia energética a ciencia cierta si se efectúa una medición y



seguimiento del consumo de energía a nivel de equipo. Por este motivo, a niveles más agregados de un sector de la economía o industria, particularmente a nivel de procesos, la variación en la intensidad de uso de energía se utiliza como una buena medida *proxy* en la medición de eficiencia energética. Esto se debe a que existen otros factores, más allá que solamente la eficiencia energética, que afectan el consumo de energía en la producción.

2.3 Indicadores de intensidad de uso para medir eficiencia energética

La intensidad de uso de energía puede ser medida como unidades de energía dividida por unidades de producto en términos termodinámicos, físicos o monetarios. En el caso de la construcción de indicadores de intensidad de uso de energía en la industria minera, de acuerdo a la literatura¹, lo más adecuado es utilizar la cuantificación en unidades físicas. Esto se debe a tres razones principales: i) los indicadores físicos entregan una medida objetiva en la cuantificación de la energía utilizada en la producción de bienes valorados por los consumidores; ii) la medición en términos físicos permite realizar una comparación temporal de la intensidad de uso sin requerir a correcciones temporales económicas como precios o costos; iii) permite la comparación internacional.

En consecuencia, la eficiencia energética en minería se podrá medir a través de los cambios producidos en los indicadores físicos de intensidad de uso de energía corregidos por variables estructurales como se muestra en (4.1):

$$EE_{jt} = \Delta \text{Intensidad de uso de energía}_{jt} = \frac{\Delta \text{Energía Consumida}_{jt}}{\Delta \text{Unidad física}_{jt}} \cdot \text{variable de corrección}_{jt} \quad (2.1)$$

Donde, j: Proceso ,t: Periodo

La *corrección* mencionada en (2.1) generalmente corresponde a la inclusión de una variable que incide directamente en el consumo de energía en un proceso o subproceso en particular. Sin embargo, la *corrección* no es necesaria en todos los casos. En ocasiones, un buen indicador de eficiencia energética se logra utilizando una unidad física que sea la principal responsable de la energía consumida en el proceso, para lo cual no siempre se requiere de una variable de corrección.

¹ Para mayor información recurrir a Patterson 1996, Philipsen 2010 y Orlando 2010.



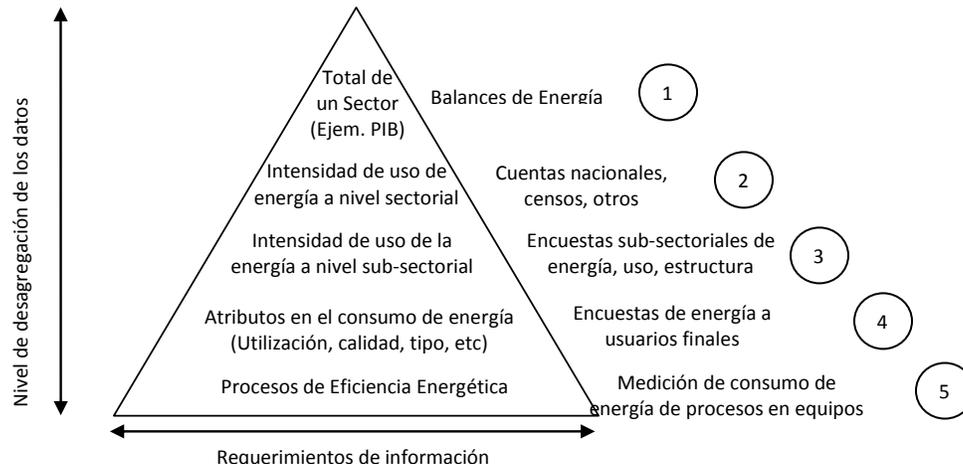
2.4 Nivel de desagregación de los datos

El grado de desagregación de datos es importante en la construcción de indicadores efectivos capaces de medir variaciones en el consumo de energía y, por ende, la eficiencia energética. En casos extremos, la eficiencia energética en términos agregados puede ser medida como la variación en el consumo de energía total de una economía dividida por el PIB (\$) de la misma. Por otro lado, la medición de intensidad de uso de la energía en una industria en particular se puede medir en su nivel más desagregado y detallado a nivel de equipos de una industria.

Mientras mayor es el grado de desagregación de los datos, mayor es la información requerida y el análisis se vuelve más complejo. Sin embargo, también es cierto que la medición de eficiencia energética se torna más detallada y precisa a medida que cuenta con información específica de subsectores e industrias. Una de las mayores restricciones para acceder a información de consumos de energía en ciertos procesos y equipos en industrias particulares, tiene relación con los altos costos asociados y con la dificultad de implementación de este tipo de mediciones. Por este motivo, se debe buscar un balance entre nivel de detalle de la información, calidad y representatividad de la misma.

En la Figura 1 se muestran diferentes niveles de agregación de datos sobre producción y consumo de energía para el análisis. Los niveles superiores corresponden a niveles macro, donde los productos son medidos generalmente en términos económicos y el consumo de energía agregado a nivel de país. Por otro lado, para el caso de subsectores de una economía, en donde se dispone de información más desagregada por industria, se pueden construir índices de consumos energéticos los que son medidos en términos de consumo energético dividido por unidades físicas de productos. Finalmente, la construcción de indicadores de intensidad de uso de energía a nivel micro, se calculan midiendo el consumo energético a nivel de procesos y/o dispositivos y unidades físicas o económicas de productos.



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería**Figura 1:** Pirámide de indicadores de consumo energéticos según información disponible

Fuente: Elaboración propia en base a Pirámide de indicadores de energía de la Agencia Internacional de Energía (AIE), 2014.

- **Primer nivel de la pirámide (corresponde al nivel más agregado):** Se define como el consumo energético de una economía dividido por su PIB (generalmente corregido por paridad de poder de compra, PPP). También se pueden utilizar otras macro variables como la población de un país. (AIE, 2014)
- **Segundo nivel de la pirámide:** Corresponde a indicadores de intensidad de uso de la energía de los macro sectores de una economía o país. Estos pueden ser medidos como la energía total de un sector de la economía dividido por el PIB del subsector. (AIE, 2014)
- **Tercer nivel de la pirámide:** Se posee información de producción física o monetaria de determinadas industrias a nivel agregado y sus respectivos consumos de energía. Esto permite construir indicadores de intensidad de energía utilizando unidades físicas de producción. (AIE, 2014)
- **Cuarto nivel de la pirámide:** Se posee información de producción y consumo energético por procesos dentro de una industria. Esta información se obtiene generalmente a través de encuestas de consumo energético y producción a usuarios finales. Se pueden construir indicadores de intensidad de uso en diferentes procesos. (AIE, 2014)
- **Quinto nivel de la pirámide:** Corresponde al nivel de medición más prolijo. Se efectúa la cuantificación de consumo energético y producción a nivel de equipos. Esto permite medir la eficiencia energética, como la variación en el consumo de energía, despejando otros factores que inciden en su consumo. (AIE, 2014)

Los indicadores agregados de intensidad de uso de energía dan una idea general de cuáles son los motivos que determinan las variaciones en el consumo de una industria o sector. Sin embargo, si se requiere entender cuáles son las variables específicas que inciden en el consumo energético de una industria, y cuantificar las medidas de eficiencia energética, es necesario utilizar niveles de información más desagregada, como por ejemplo los consumos de energía a nivel de procesos.

Los datos de la industria del cobre recogidos por Cochilco para el presente estudio permiten una desagregación de la información que alcanza el cuarto nivel de la pirámide. Lo que permite construir indicadores capaces de medir la eficiencia energética en la industria minera por procesos.



3. Metodología

La metodología empleada se divide en dos partes.

Se definieron indicadores de intensidad de uso de energía corregidos por variables estructurales, tomando como base la información histórica de Cochilco sobre el consumo unitario de energía por procesos de la minería del cobre en Chile. El objetivo de esta corrección era la obtención de indicadores insesgados capaces de medir la eficiencia energética en los diferentes procesos de la minería del cobre.

Para la construcción de indicadores capaces de medir la eficiencia energética en minería se conformó un comité en el contexto de la *Mesa Minera de Energía Sustentable (MMES)*², con objeto de definir los requerimientos de indicadores insesgados. En este caso, Cochilco actuó como recopilador y sintetizador de ideas aportadas por los integrantes, teniendo la tarea de proponer indicadores corregidos e insesgados de intensidad de uso de energía para los procesos de la minería del cobre.

En virtud de ello, se recopiló información complementaria, en concordancia con los requerimientos establecidos, respecto del consumo de energía y productos por procesos para la construcción de los indicadores para el periodo 2007 - 2013. Para la recopilación de información se utilizó la *Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE)*³ que realiza anualmente Cochilco. (Ver anexo A)

3.1 Construcción de indicadores

Los indicadores de intensidad de uso de energía propuestos en el presente informe son producto del trabajo conjunto de Cochilco y la Mesa Técnica de Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética de la MMES. Su definición se desarrolló a través de reuniones periódicas donde se compartieron experiencias, fundamentos teóricos metodológicos y prácticos.

La Mesa Técnica de Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética, tomó como referencia los actuales indicadores de intensidad de uso de energía presentes en el

² La Mesa Minera de Energía Sustentable es una entidad que reúne a empresas de la gran minería y a organismos públicos y privados. La finalidad de esta mesa es la de apoyar iniciativas que tengan por finalidad el uso eficiente del recurso energético en la industria minera, así como también la de intercambiar experiencias, mejorar la gestión y desarrollar proyectos transversales a la industria que vayan en beneficio del uso responsable y sostenible en materia energética.

³ Encuesta que desarrolla COCHILCO anualmente a las principales faenas mineras productoras de cobre del país. En esta encuesta se recoge información de producción, consumo de energía y consumo de agua por procesos. Para mayor información sobre la encuesta ver anexo A.



documento *“Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre 2013”*, preparado anualmente por Cochilco. Este documento muestra los consumos unitarios de energía de la industria minera del cobre en de los procesos de: Mina Rajo, Mina Subterránea, Concentradora, LXSXEW, Fundición y Refinería.

Uno de los principales desafíos en la construcción de indicadores de consumo energético que reflejen las medidas de eficiencia energética, es la identificación y clasificación de variables exógenas y endógenas involucradas en cada proceso. La identificación y clasificación de este tipo de variables determina si un indicador se encuentra bien especificado para la medición de eficiencia energética o si debe ser corregido.

El método de construcción de indicadores se puede resumir en:

1. Identificación de proceso minero: Mina Rajo, Mina Subterránea, Concentradora, LXSXEW, Fundición y Refinería.
2. Identificación de las variables presentes en los procesos mineros en base a indicadores existentes en el informe de Cochilco *“Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre”*.
3. Clasificación de las variables en endógenas y exógenas.
4. En caso de ser posible y necesario, crear un indicador que neutralice el efecto de las variables exógenas.

El método mencionado se utilizó para la definición de indicadores corregidos para los procesos de: mina rajo, concentradora, LXSXEW, fundición y refinería, en base a los indicadores de intensidad de uso publicados por Cochilco. Sin embargo, no todos los indicadores pudieron o debieron ser corregidos, pues su especificación era correcta o una de las variables exógenas del indicador no pudo ser reemplazada o corregida.

3.2 Recopilación de información y utilización de datos

Se accedió a los datos para la construcción de los indicadores corregidos utilizando la encuesta anual *Minera de Producción, Agua y Energía* que realiza Cochilco la cual es aplicada a las principales faenas productoras de cobre del país. Utilizando la encuesta mencionada se solicitó información de producción, consumo de electricidad y consumo de combustibles en el periodo 2007 - 2013 (para mayor detalle ver Tabla 2)



Tabla 2: Información adicional solicitada en encuesta EMPAE 2013

Producción 2007 - 2013	Consumo de electricidad 2007 - 2013	Consumo de Combustibles⁴ 2007 - 2013
Mina rajo abierto	Mina rajo abierto	Mina rajo abierto
Material cargado por palas (Kton)	Carguío (Kwh)	Carguío
Distancias medias equivalentes de acarreo de mineral (Km eq)	Transporte (Kwh)	Transporte
Distancias medias equivalentes de acarreo de lastre (Km eq)		
Mina subterránea	Mina Subterránea	Mina subterránea
Distancias medias equivalentes de acarreo de mineral (Km eq)	Transporte (Kwh)	Transporte
LXSXEW	LXSXEW	LXSXEW
Mineral tratado HEAP (KTM)	Lixiviación HEAP (Kwh)	Lixiviación HEAP
Ley mineral tratado HEAP (%)	Lixiviación ROM (Kwh)	Lixiviación ROM
Mineral tratado ROM (KTM)	SXEW (Kwh)	
Ley mineral ROM (%)		

Fuente: Elaboración propia, Cochilco, 2014.

La encuesta EMPAE 2013 fue aplicada a un total de 36 faenas mineras productoras de cobre mina, donde se incluyen 6 fundiciones y 3 refinerías. Es importante mencionar que las empresas que entregaron correctamente la información adicional solicitada representan en torno al 94% de la producción de cobre mina a nivel nacional. Estos resultados permiten hacer un análisis cuantitativo representativo de los indicadores de consumo de energía corregidos por variables estructurales de la industria minera del cobre.

⁴ Los combustibles consultados en la encuesta EMPAE 2013 y sus respectivas unidades se listan a continuación: Carbón (Kg), Gasolina (m3), Diesel (m3), Enap 6 (TM), Kerosene (m3), Gas Licuado (Kg), Gas Natural (m3), Leña/Pellets/Astillas (Kg), Butano (lts), Nafta (m3) y Propano (m3). Su cuantificación en unidades energéticas se realiza usando los factores de conversión utilizados en el informe de COCHILCO "Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre 2013".



4. Propuesta de indicadores corregidos

Este capítulo presenta la proposición de nuevos indicadores y el fundamento de esta propuesta en la construcción de indicadores de eficiencia energética.

Para estos efectos se presentan los indicadores actuales de intensidad de uso de energía por procesos en la minería, en conjunto con un nuevo indicador corregido por las principales variables estructurales identificadas. Las correcciones se aplican sobre aquellos procesos cuyos indicadores actuales se ven más afectados por variables exógenas. Por ello, los indicadores propuestos solo corresponden a procesos o subprocesos mineros donde se cuenta con los datos necesarios para corregir los efectos de variables exógenas. En consecuencia, un indicador corregido para medir eficiencia energética no es equivalente ni reemplaza la información de los indicadores de intensidad de consumo de energía unitaria actuales.

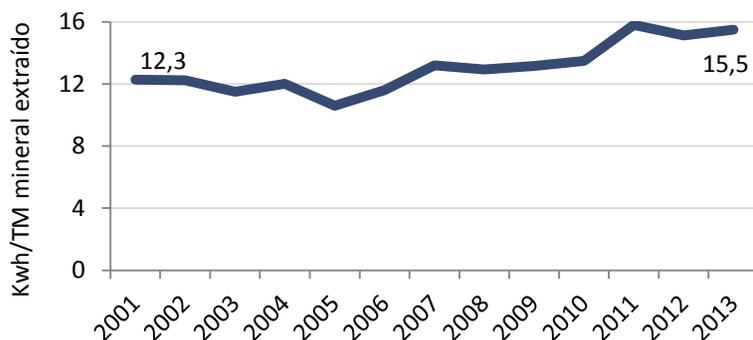
De manera particular los indicadores corregidos afectan a los procesos: Mina Rajo, Mina Subterránea, Concentradora y LXSXEW.

4.1 Indicador Mina Rajo

El indicador de consumo unitario de combustibles en el proceso de mina rajo es sumamente importante ya que representa más del 75% del consumo total energía en combustibles en la minería del cobre al año 2013. Esto se debe que el transporte de mineral y lastre se realiza principalmente en camiones los cuales son intensivos en el uso de combustibles.

El actual indicador de consumo unitario de combustibles en el proceso de Mina Rajo publicado por Cochilco muestra una tendencia al alza escondiendo las medidas de eficiencia energética aplicadas por la minería (ver Figura 2). El principal problema del indicador actual es que se atribuye al mineral extraído el consumo de combustible incurrido en el transporte de lastre y adicionalmente existe un aumento en las distancias de acarreo. Como resultado se aprecia en este indicador un aumento de un 26% en el consumo unitario de combustibles en el periodo 2001 - 2012.



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería**Figura 2:** Consumo unitario de combustibles por mineral extraído – Mina rajo (Kwh/Ton mineral extraído)

Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, COCHILCO, 2014.

Para corregir el indicador de consumo de combustibles en el proceso de mina Rajo primero se identificaron las variables endógenas y exógenas involucradas. Dentro de las variables endógenas se reconocieron principalmente el mineral extraído y la cantidad de horas operativas de los camiones que realizan el transporte de material. Por otro lado, las variables exógenas identificadas corresponden a las distancias de acarreo y razón de estéril mineral.

Tabla 3: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de combustibles en el proceso de extracción Mina Rajo

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> Material movido Horas operativas 	<ul style="list-style-type: none"> Distancia de transporte Pendiente promedio Razón estéril/mineral

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

Para corregir los actuales indicadores de intensidad de uso de la energía en el proceso de extracción Mina Rajo se proponen las siguientes modificaciones,

a) Consumo de combustibles:

- Enfoque en el consumo de combustibles por representar más del 90% del consumo energético total del proceso Mina Rajo; específicamente en el consumo de energía (combustibles) en subproceso de transporte.
- Utilizar como unidad física del indicador corregido el material movido en vez del mineral extraído.



- Se debe corregir por kilómetro recorrido equivalente. Este factor considera dos factores estructurales de la minería, estas son las distancias recorridas y las pendientes asociadas a estas distancias, que inciden en el aumento de energía por tonelada de mineral extraído.

b) Consumo de electricidad:

- Mina Rajo contiene una serie de procesos unitarios que consumen energía eléctrica, donde los más importantes son el Chancado primario y el Carguío. Se enfoca la construcción de un indicador en el proceso unitario de chancado primario por su importancia relativa y calidad de los datos.
- Indicador de intensidad de uso de electricidad del chancado primario ya que el consumo eléctrico en otros procesos unitarios del rajo son heterogéneos y no permiten un seguimiento de la eficiencia energética.

Se proponen dos nuevo indicadores de intensidad de uso de energía, específicamente en los subprocesos de Transporte (Camiones) y Chancado Primario. El primer indicador corregido considera la totalidad del material extraído (mineral más estéril), en lugar de solo el mineral, lo que corrige las variaciones estéril-mineral en el proceso unitario de extracción mina. Adicionalmente, el indicador es corregido por distancias de acarreo crecientes en el tiempo, la que inciden en un mayor consumo de combustible. Por otro lado, el nuevo indicador de Chancado Primario permite analizar la intensidad de uso de electricidad y la eficiencia energética en este proceso unitario ya que no incluye variables que sesguen la medición.

Tabla 4: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de extracción Mina Rajo

Indicadores de intensidad de uso (actual)	Propuesta de Indicador de Intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton Mineral extraído}} \quad \frac{\text{Energía eléctricas}}{\text{Ton Mineral extraído}}$	<p>Transporte:</p> $\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton material movido x Km recorrido eq.}}$
$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton CuFino en mineral}} \quad \frac{\text{Energía eléctricas}}{\text{Ton CuFino en mineral}}$	<p>Chancado Primario:</p> $\frac{\text{Energía eléctrica en Chancado}}{\text{Ton mineral Chancado}}$

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

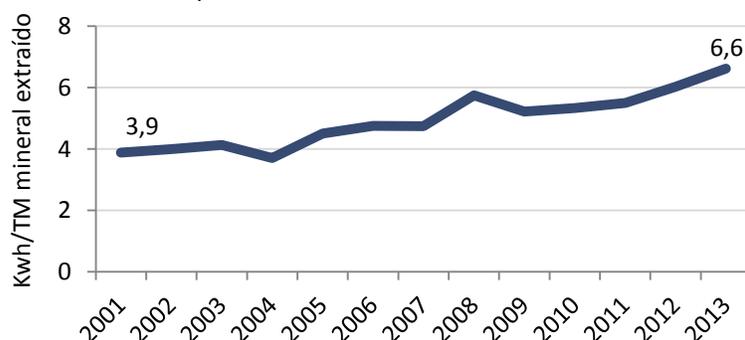


4.2 Indicador Mina Subterránea

En el caso del proceso de extracción de Mina Subterránea el 71% del consumo energético corresponde a energía eléctrica. Los principales subprocesos que determinan el consumo eléctrico corresponden al Carguío, Chancado Primario y Ventilación.

Actualmente Cochilco publica dos indicadores de intensidad de uso de energía eléctrica en el proceso de extracción Mina Subterránea, donde se utilizan dos unidades físicas de producción: i) tonelada de mineral extraído y ii) cobre fino contenido en mineral extraído. El indicador que cuantifica la electricidad consumida por mineral extraído se visualiza una tendencia al alza con un incremento del 69% en el periodo 2007-2013.

Figura 3: Consumo unitario de electricidad por mineral extraído – Mina subterránea (Kwh/Ton mineral extraído)



Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, Cochilco, 2014.

Los principales factores que inciden en la variación en la intensidad de uso de la energía en el proceso global de extracción Mina Subterránea son de carácter exógeno como: el aumento del número de Km de túneles a ventilar, aumento de las distancias de acarreo a piques de traspaso y puntos de transporte de mineral, entre otras.

Tabla 5: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de combustibles en el proceso de extracción Mina Subterránea

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> Mineral movido Horas operativas 	<ul style="list-style-type: none"> Distancia de transporte Ventilación en galerías y túneles

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.



Una de las variables exógenas que inciden en el aumento de del consumo de energía en minería subterránea corresponde al aumento de la ventilación en galerías, principalmente por el aumento de la extensión de las galerías. Sin embargo, no se posee información de variables para medir de manera insesgada y corregir el consumo de electricidad en este subproceso.

Por este motivo, para efectos de medir eficiencia energética, se propone las siguientes modificaciones,

- a) Consumo de combustibles:
 - No efectuar correcciones de indicadores actuales de intensidad de uso de combustibles debido a la baja participación relativa del consumo de combustibles sobre el total de consumo de energía en el proceso de Mina Subterránea.

- b) Consumo de electricidad:
 - Considerar solo los consumos eléctricos que dependen de la cantidad de mineral extraído (tronadura, transporte y carguío) y excluir la ventilación que depende del diseño y evolución de la mina.

Se propone entonces un nuevo indicador de intensidad de uso en minería subterránea que considere el consumo eléctrico por la extracción de mineral, pero excluye el consumo eléctrico por concepto de ventilación.

Tabla 6: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de extracción Mina Subterránea

Indicador de intensidad de uso (actuales)	Propuesta de Indicador de intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Mineral extraído}} \quad \frac{\text{Energía eléctricas}}{\text{Ton. Mineral extraído}}$	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Mineral extraído}}$
$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Cufino en mineral extraído}} \quad \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Cu fino en mineral extraído}}$	(No se considera el consumo de energía debido a ventilación de túneles)

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.



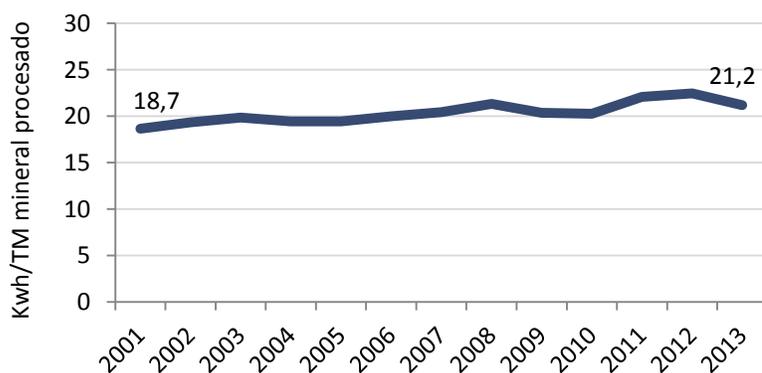
4.3 Indicador Planta Concentradora

El indicador de intensidad de uso de energía en Planta Concentradora se vuelve relevante porque muestra las variaciones de consumo del proceso que representa más del 50% de la electricidad total usada en la minería del cobre. Esto se debe a que los procesos de conminución (chancado y molienda) y transporte (bombeo y correas) son intensivos en el uso de energía.

El actual indicador presentado por Cochilco, de intensidad de uso de electricidad en la Planta Concentradora, donde la unidad física de producción es el mineral tratado conceptualmente es correcto. Cuando se usa el mineral tratado como unidad física de medida, este no distorsiona ni sesga el consumo unitario de energía por leyes de mineral decrecientes en el tiempo. Sin embargo, el indicador presenta dos problemas. Primero, el indicador presentado actualmente incluye la energía usada en plantas de recuperación de molibdeno, lo que aumenta de manera artificial el consumo energético unitario de la planta concentradora. Segundo, la dureza del mineral incide directamente en la variación de consumo energético en el chancado y molienda.

Cuando se analiza la evolución en el tiempo de la intensidad de uso de la electricidad en la minería del cobre, se visualiza una tendencia al alza en los últimos diez años. Si el año 2007, el consumo unitario promedio de las plantas concentradoras de cobre fue de 18,7 Kwh por tonelada de mineral procesado, este valor aumenta a un 21,2 Kwh por tonelada de mineral procesado en el año 2013 lo que representa un alza de un 13%.

Figura 4: Consumo unitario de electricidad por mineral procesado – Planta Concentradora (Kwh/Ton mineral procesado)



Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, Cochilco, 2014.



Las principales variables exógenas que determinan el consumo energético en la planta concentradora corresponden a la ley y dureza del mineral tratado. La ley del mineral, entre otras variables, determina las cantidades de cobre que pueden ser recuperadas durante el proceso. En este sentido, una menor ley de cobre del mineral procesado en el tiempo, a tasas constantes de tratamiento, implica una menor producción de concentrado. Por otro lado, la dureza del mineral también afecta la energía utilizada en el proceso unitario de chancado y molienda. Mientras mayor sea la dureza del mineral, mayor será la cantidad de energía necesaria para alcanzar un tamaño de partícula adecuado para la flotación.

Tabla 7: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en la Planta Concentradora

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> • Mineral tratado • Recuperación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ley de mineral • Dureza

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

Para corregir los actuales indicadores de intensidad de uso de la energía en el proceso de Planta Concentradora se propusieron los siguientes alcances y modificaciones:

- a) Consumo de combustibles:
 - No efectuar correcciones de indicadores actuales de intensidad de uso de combustibles debido a la baja participación relativa del consumo de combustibles sobre el total de consumo de energía en la planta concentradora.

- b) Consumo de electricidad:
 - Indicador propuesto debe medir la intensidad de uso de electricidad ya que este tipo de energía representa más del 95% del consumo total tal de energía en la Planta Concentradora.
 - El indicador propuesto debe eliminar el consumo energético incurrido por las plantas de molibdeno del total de energía consumida por planta Concentradora con motivo de no efectuar un sesgo en el indicador.
 - El indicador propuesto no debe considerar el cobre fino como unidad de medida física ya que es dependiente de la ley del mineral tratado.



Tabla 8: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Planta Concentradora

Indicador de intensidad de uso (actuales)	Propuesta de Indicador de intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Mineral tratado}} \cdot \frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Mineral tratado}}$ $\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Cufino en concentrado}} \cdot \frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Cufino en concentrado}}$	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Mineral tratado}}$ (No considera consumo de plantas de molibdeno)

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

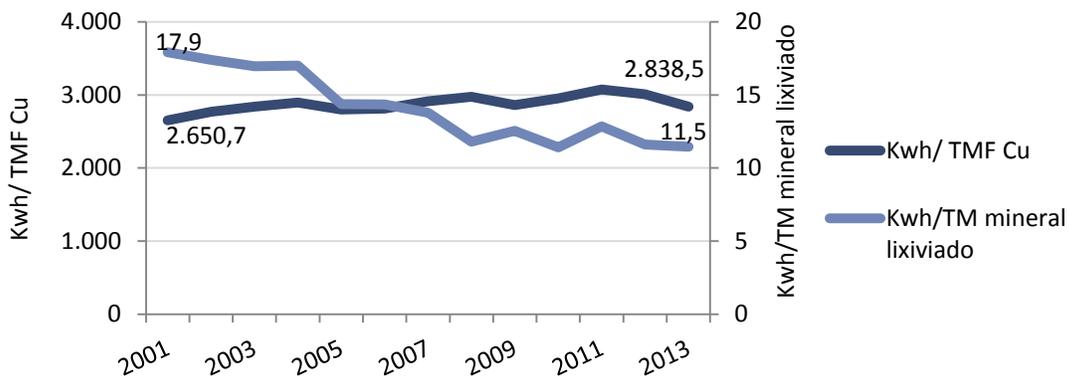
4.4 Indicador LXSXEW

La producción de cobre a través de LXSXEW es un proceso intensivo en el uso de energía eléctrica. El año 2013 su participación alcanzó el 27% del consumo total de electricidad en la minería del cobre.

Actualmente Cochilco entrega dos indicadores unitarios de consumo de electricidad en el proceso de LXSXEW para medir su intensidad de uso. Un indicador mide la cantidad de fino producido como unidad física de producto, mientras que el otro usa como unidad física el tonelaje total tratado. Sin embargo, ambas mediciones crean distorsiones de los resultados del indicador en el tiempo.

En el caso del indicador que mide la intensidad de uso de la electricidad por tonelada de cobre fino producido muestra una tendencia al alza debido principalmente a la disminución de las leyes promedio de cobre del mineral lixiviado. Por otro lado, el indicador que mide la intensidad de uso de electricidad tomando como medida física el mineral lixiviado, muestra una fuerte tendencia a la baja en el periodo 2001 – 2013. De hecho, este indicador disminuye en un 36% en el periodo de tiempo antes mencionado. Este fenómeno ocurre principalmente al aumento de tonelaje en el procesamiento de minerales de baja ley (lixiviación ROM).



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería**Figura 5:** Consumo unitario de electricidad por mineral extraído y cobre fino producido – LXSXEW (Kwh/Ton mineral lixiviado – Kwh/TMF Cu)

Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, Cochilco, 2014.

La operación tiene control sobre las cantidades de mineral que serán tratados y la recuperación promedio objetivo de acuerdo a las características del mineral; por lo que estas variables son consideradas endógenas. Sin embargo, existen variables dentro del proceso que son consideradas exógenas como la ley del mineral tratado y el tipo de tratamiento por el cual puede ser procesado.

Tabla 9: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de LXSXEW

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> Mineral tratado Recuperación 	<ul style="list-style-type: none"> Ley Tipo de tratamiento (ROM o HEAP)

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

Para corregir los actuales indicadores de intensidad de uso de la energía en el proceso de LXSXEW se propusieron los siguientes alcances y modificaciones:

a) Consumo de combustibles:

- No efectuar correcciones de indicadores actuales de intensidad de uso de combustibles debido a una baja participación relativa del consumo de combustibles sobre el total de consumo de energía en el proceso de LXSXEW.

b) Consumo de electricidad:

- Indicador propuesto debe medir la intensidad de uso de electricidad ya que este tipo de energía representa más del 80% del consumo total en este proceso.
- Separar dos subprocesos que son intensivos en el uso de electricidad, como son la lixiviación y extracción por solventes-electroobtención. Ambos procesos

unitarios poseen comportamientos diferentes frente a cambios en las variables como ley de mineral y mineralogía.

- Diferenciar los procesos de lixiviación en: Lixiviación ROM y HEAP; en caso de existir información suficiente.
- Utilizar como unidad física de medición el tonelaje de cátodos electro obtenidos tanto para la medición de intensidad de uso en LX y SXEW.

Se proponen 3 nuevos indicadores corregidos para la medir la intensidad de uso de la electricidad en el proceso de recuperación de cobre por el proceso hidrometalúrgico. Los tres indicadores tienen relación con la separación de subprocesos de LXSXEW, en donde se identifican: Lixiviación ROM, Lixiviación HEAP y SXEW. En todos los casos se medirá el indicador como la electricidad total utilizada en cada subproceso dividido por el tonelaje producido de cobre fino en la planta de electro obtención.

Tabla 10: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de LxSxEw

Indicador de intensidad de uso (actuales)	Propuesta de Indicador de intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Mineral tratado}} + \frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Mineral tratado}}$	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación ROM $\frac{\text{Energía eléctrica Lx}}{\text{Ton. Cátodos EO}}$
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Cu fino en Cátodos EO}} + \frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Cu fino en Cátodos EO}}$	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación HEAP $\frac{\text{Energía eléctrica Lx}}{\text{Ton. Cátodos EO}}$
	<ul style="list-style-type: none"> • SxEw $\frac{\text{Ener. eléctrica SxEw}}{\text{Ton. Cátodos EO}}$

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

4.4 Indicador Fundición

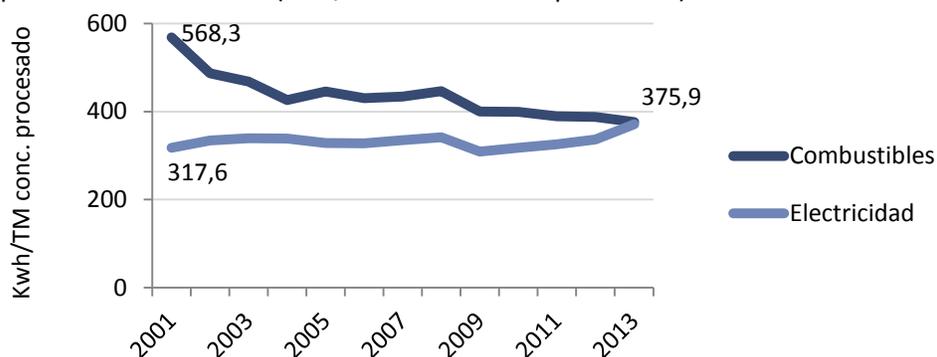
El proceso de fundición representa el 9% del consumo total de combustibles y el 8% del consumo total de electricidad en la minería del cobre al año 2013.

Los indicadores publicados actualmente por Cochilco hacen referencia al consumo unitario de energía (electricidad y combustibles) en el proceso de fundición de cobre, dividido por toneladas de concentrado tratado y toneladas de cobre contenido en ánodos refinados a fuego respectivamente. La tendencia del consumo de combustibles



en el periodo 2001 – 2013 ha sido a la baja, donde se aprecia una disminución del consumo unitario de combustibles de un 34%, si se considera el concentrado como unidad física de medida. En el caso del indicador de consumo de electricidad por tonelada de concentrado procesado su variación ha sido creciente en el periodo 2009 – 2013 donde se aprecia un aumento en el consumo unitario de electricidad de un 21% (ver figura 6).

Figura 6: Consumo unitario de energía por cantidad concentrados procesado – Fundición (Kwh/Ton concentrado procesado)



Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, COCHILCO, 2014.

Se identifica como variable endógena del proceso el tonelaje de concentrado tratado. Por otro lado, la variable exógena que se identifica en el proceso de Fundición es la ley de cabeza del concentrado procesado. En este sentido, los indicadores actuales que miden la intensidad de uso de combustibles y electricidad considerando como unidad física el concentrado procesado, son capaces de mostrar mejoras tecnológica o de gestión en la operación de la fundición que inciden en el menor consumo de energía, al carecer de variables exógenas relevantes que incidan en su consumo.

Tabla 11: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de LXSXEW

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> Concentrado procesado 	<ul style="list-style-type: none"> Ley de concentrado procesado

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.



Se concluye que este indicador no requiere de correcciones para mostrar mejoras en el uso del consumo de eficiencia energética dentro de la operación. Por este motivo el indicador propuesto es el mismo que se utiliza para medir la intensidad de uso de energía por concentrado procesado. Sin embargo, debe quedar claramente establecido que el indicador de intensidad de uso de la energía que utiliza como unidad física el cobre contenido en el concentrado procesado no es un buen indicador para medir la eficiencia energética, ya que este es dependiente de la ley de cabeza del procesado que ingresa a este proceso.

Tabla 12: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Fundición

Indicador de intensidad de uso (actuales)		Propuesta de Indicador de intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Concentrado procesado}}$	$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Concentrado procesado}}$	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Concentrado procesado}}$
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Ton. Cu fino en ánodos}}$	$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Cu fino en ánodos}}$	$\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Ton. Concentrado procesado}}$

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.

4.5 Indicador Refinería

La refinería es uno de los procesos dentro de la industria que posee menor consumo energético en términos globales. En el año 2013 este proceso consume aproximadamente el 1% del consumo de electricidad y el 1% de combustibles en la industria minera del cobre.

Actualmente Cochilco entrega un indicador de intensidad de uso de energía para el proceso de Refinería, en donde la unidad física de producto es el cátodo de cobre. En este caso, solo se hace una diferenciación de la intensidad del uso de la energía diferenciada por tipo de energía utilizada: electricidad y combustibles. Este indicador de intensidad de uso de energía no se diferencia por unidad física de insumo o producto, ya que su diferencia medida en unidades de Toneladas es marginal.

Los indicadores actuales de intensidad de uso de energía en Refinería por tipo poseen comportamientos diferentes en el tiempo. Por un lado se aprecia que el consumo unitario de electricidad es estable en el periodo 2001 - 2013, sin embargo, existe variación en la intensidad de uso de combustibles en el mismo periodo.

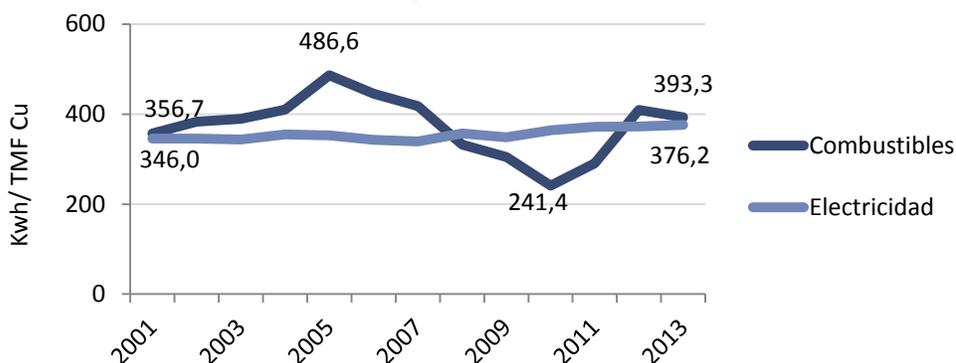


Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería

El consumo unitario de electricidad tiene una tasa de incremento positivo anual promedio de un 0,7% en el periodo 2001-2013.

El consumo unitario de combustibles en el proceso de Refinería ha sido variable. Este índice tuvo un aumento en el período 2001 – 2005 donde alcanzó un consumo máximo de energía de 486,6 Kwh por tonelada de ánodos refinado en el año 2005. Este mismo indicador, luego disminuye su consumo energético en el periodo 2005 – 2010, para alcanzar su mínimo en este último año con un consumo unitario de combustibles de 241,4 Kwh por tonelada de cobre refinado. Finalmente, en el periodo 2010 – 2013 tiene un nuevo aumento hasta alcanzar los 393,3 Kwh por tonelada de cobre refinado en el año 2013. (Ver Figura 7)

Figura 7: Consumo unitario de energía por cantidad ánodos a fuego procesados – Refinería (Kwh/Ton concentrado procesado)



Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de consumo de energía, Cochilco, 2014.

Este indicador no posee variables exógenas identificables por las cuales deba ser corregido. En este sentido, el indicador publicado por Cochilco no debe ser corregido por variables que incidan en la variación de la intensidad de uso en el tiempo.

Tabla 13: Identificación de variables endógenas y exógenas del indicador de intensidad de uso de electricidad en proceso de Refinación de Cobre

Variables endógenas	Variables exógenas
<ul style="list-style-type: none"> • Cátodos ER producidos • Intensidad de corriente 	- No se identifican

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.



Se concluye que este indicador no requiere de correcciones ya que no existen variables exógenas que incidan artificialmente en el aumento de consumo de energía en el tiempo.

Tabla 14: Indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso en el proceso de Refinación

Indicador de intensidad de uso (actuales)	Propuesta de Indicador de intensidad de uso (corregido)
$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Cu fino en Cátodos ER}}$ $\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Cu fino en Cátodos ER}}$	$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Cu fino en Cátodos ER}}$ $\frac{\text{Energía combustibles}}{\text{Cu fino en Cátodos ER}}$

Fuente: Mesa Técnica de Construcción de Indicadores, MMES, 2013.



5. Resultados de Indicadores de Eficiencia Energética

Este capítulo se muestra los resultados cuantitativos de indicadores propuestos de intensidad de uso de energía para la medición de eficiencia energética en procesos mineros sobre la base de los datos suministrados para el periodo 2007 – 2013.

A continuación se mostrarán los principales resultados obtenidos en la construcción de indicadores de intensidad de uso de energía en la minería del cobre corregidos por variables estructurales para los procesos de Mina Rajo, Mina Subterránea, Concentradora, Lixiviación (LX) y SXEW en el periodo 2007 - 2013. Para los casos de los procesos de Fundición y Refinería, estos indicadores no serán presentados ya que su indicador no fue modificado.

En cada proceso presentado se comparará el desempeño del nuevo indicador de intensidad de uso de energía corregido versus al actual indicador de Cochilco de acuerdo a la especificación de cada uno. Adicionalmente, se analizará la variación en el tiempo de ambos indicadores en base 100 al año 2007.

Los indicadores de intensidad de uso de energía corregidos en diferentes procesos y subprocesos corresponden al promedio ponderado de los indicadores por faena. La ponderación de cada faena se lleva a cabo según su peso relativo de unidad física a considerar en relación al total de las faenas en un año “t” específico (ver 5.1).

$$Intensidad\ uso\ de\ energía_{jt} = \sum_i^n \frac{Unidad\ física_{jit}}{Total\ Unidad\ física_{jt}} \cdot \frac{Energía\ Consumida_{jit}}{Unidad\ física_{jt}} \cdot corrección_{jt} \quad (5.1)$$

Donde;

j: Proceso, *t*: Periodo y *i*: Faena minera

Por último, en la sección Anexo B se muestra el detalle de la información extraída de la encuesta para la construcción histórica de los indicadores corregidos por variables estructurales de acuerdo a la información adicional consultada por la encuesta EMPAE 2013.

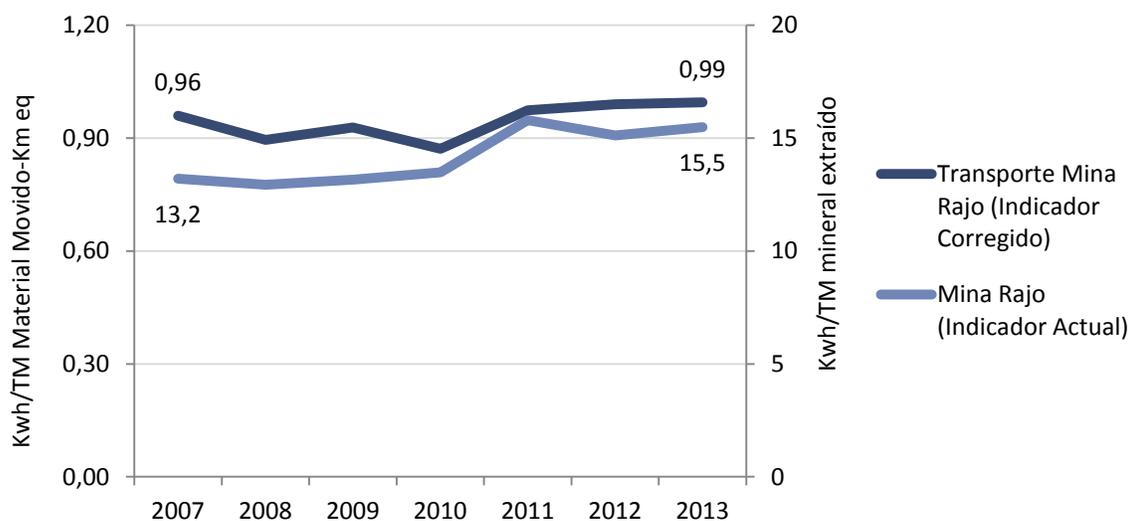


5.1 Resultado indicador Mina Rajo

En la Figura 8 se presenta el comportamiento del nuevo indicador propuesto de intensidad de uso de combustibles para el subproceso de Transporte Mina Rajo. Este indicador tiene como propósito cuantificar las variaciones en el consumo unitario de combustibles en el proceso de extracción y transporte de mineral, corrigiendo por las distancias de acarreo y material extraído (lastre más mineral) como unidad física de medida.

El indicador actual de Mina Rajo se encuentra sesgado ya que no cuantifica el lastre movido como una variable física que consuma energía. Adicionalmente, atribuye el consumo total de energía de cada proceso unitario al mineral extraído, donde no se incorpora la variación de las distancias de acarreo. En este sentido, el indicador corregido propuesto considera solo las variables determinantes en el consumo de combustibles en el subproceso de transporte. Por este motivo, el indicador corregido incorpora como unida física de medida el material (lastre más mineral) total transportado y una corrección por distancias de acarreo utilizado la variable unidad de kilómetro equivalente.

Figura 8: Indicadores de consumo de combustibles en el transporte de material en Mina Rajo



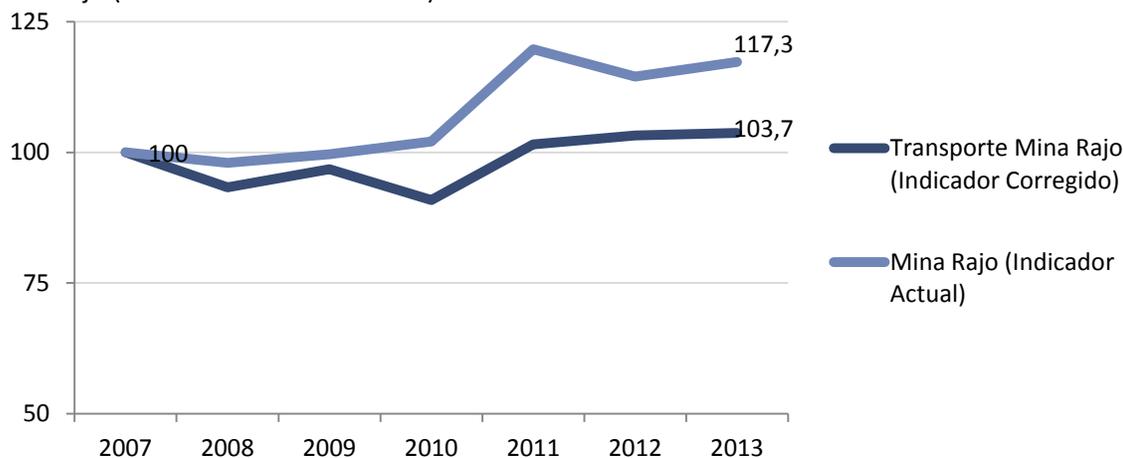
Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

Se identifica una tendencia alza de los indicadores, propuesto y actual, lo cual es sinónimo de un aumento en el consumo de combustibles de manera unitaria. En el caso del indicador del subproceso de Transporte Mina Rajo Corregido este tiene un aumento



de un 3,7% en el periodo 2007 a 2013, mientras que el indicador actual de Mina Rajo presentado por Cochilco muestra un incremento de un 17% (ver figura 9).

Figura 9: Variación de indicadores de consumo de combustibles en el transporte de material en Mina Rajo (año base 2007=100 – País)



Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

El nuevo indicador propuesto muestra que las variables de aumento de distancias de acarreo y el aumento de transporte de material movido son determinantes en el mayor consumo unitario de combustibles en Mina Rajo. De esta manera, el nuevo indicador propuesto mide de mejor manera la eficiencia energética en el proceso de extracción, ya que incluye aquellas variables omitidas en el indicador actual de intensidad de uso de combustibles publicado por Cochilco.

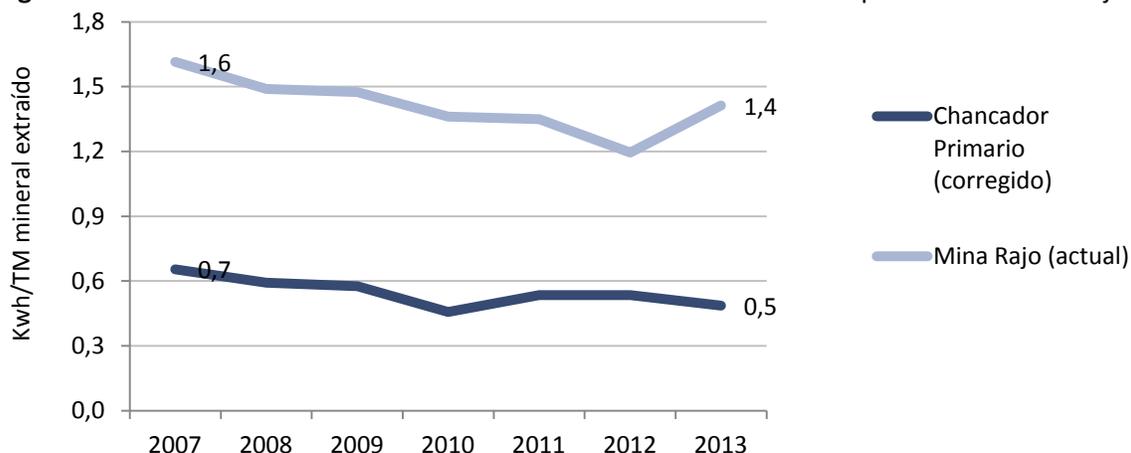
La construcción de este nuevo indicador no está exento de problemas. Primero que todo se requiere de mayor información por parte de las empresas mineras para su construcción, lo que se traduce en una encuesta más amplia y difícil de contestar. El indicador propuesto no es un indicador intuitivo, ya que posee unidades de Kilómetros y Toneladas de material en su denominador. Sin embargo, al corregir los factores exógenos se mide de mejor manera las variaciones en el consumo unitario en el tiempo.

Adicionalmente para el caso del proceso de Mina Rajo se construyó un indicador de intensidad de uso de energía eléctrica específico para el proceso unitario de Chancado primario. En este sentido, los datos utilizados para la construcción de este indicador son consistentes y confiables, lo que permite la medición efectiva de la eficiencia energética en este proceso unitario. Es importante mencionar existe una variable exógena que posee este indicador; la dureza del mineral. Sin embargo, esta variable, según los datos obtenidos tiene una incidencia marginal en el aumento del consumo de energía, al



menos en el periodo 2007 – 2013. En términos absolutos, el indicador de Chancador primario posee una disminución en su consumo unitario de energía de un 25,6% en el periodo 2007 – 2013.

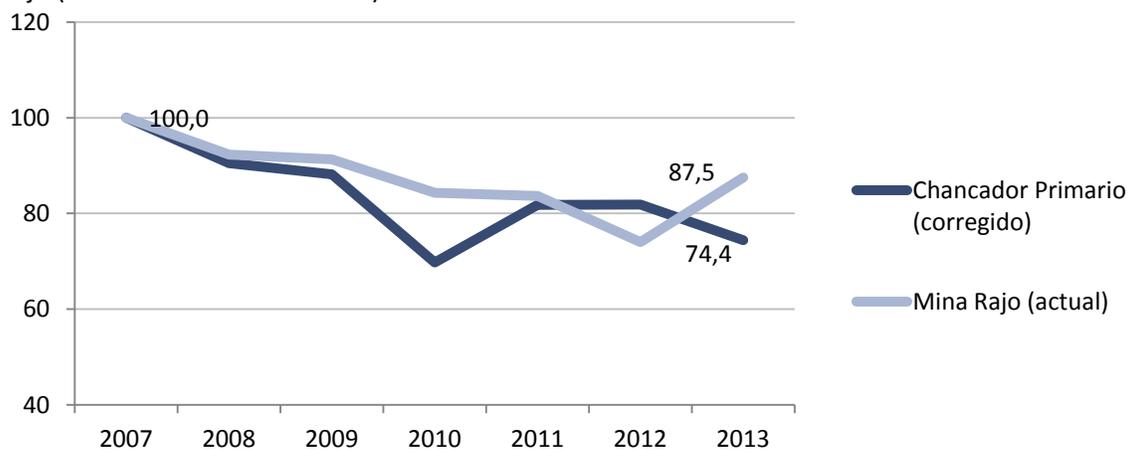
Figura 10: Indicadores de consumo unitario de electricidad en Chancado primario en Mina Rajo



Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

Cuando se analizan las variaciones de los indicadores propuestos y corregidos para el caso de la intensidad de uso de electricidad en el caso del Chancado Primario, se observa una tendencia a la baja en la intensidad de uso de energía. Para el caso del indicador actual, este posee una disminución en el consumo unitario de 12,5%, mientras que el indicador corregido posee una disminución del 25,6% en el periodo 2007 – 2013.

Figura 11: Variación de indicadores de consumo de electricidad en Chancador primario en Mina Rajo (año base 2007=100 – País)



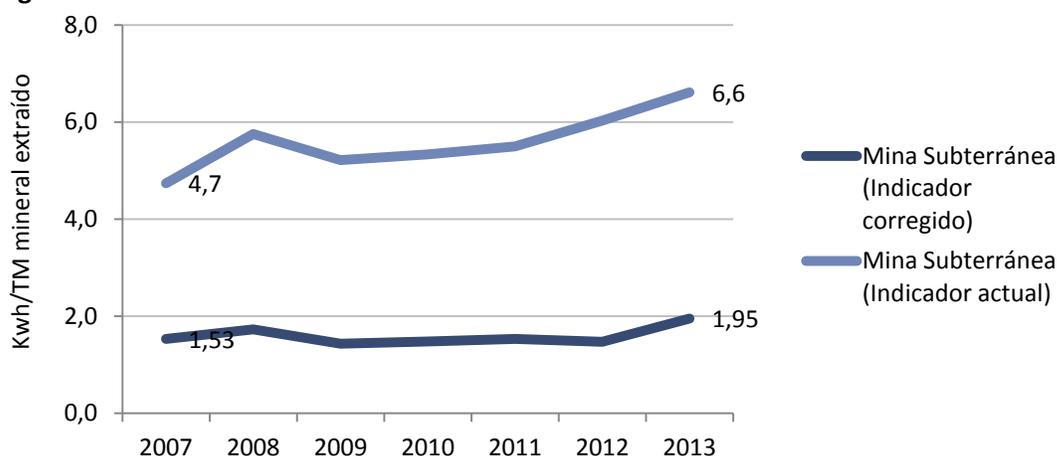
Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.



5.2 Resultado indicador Mina Subterránea

El nuevo indicador propuesto de consumo de electricidad en minería subterránea considera solo aquellos procesos que se encuentran directamente relacionados con la extracción de mineral, como por ejemplo la perforación, carguío, transporte, pero excluye el subproceso de ventilación. El comportamiento indicador corregido se muestra en la figura 12 donde el año 2007 el consumo de electricidad fue de 1,53 Kwh por tonelada de mineral extraído, mientras que para el año 2013 este consumo aumenta a 1,95 Kwh por tonelada de mineral extraído.

Figura 12: Indicadores de consumo unitario de electricidad en Mina Subterránea



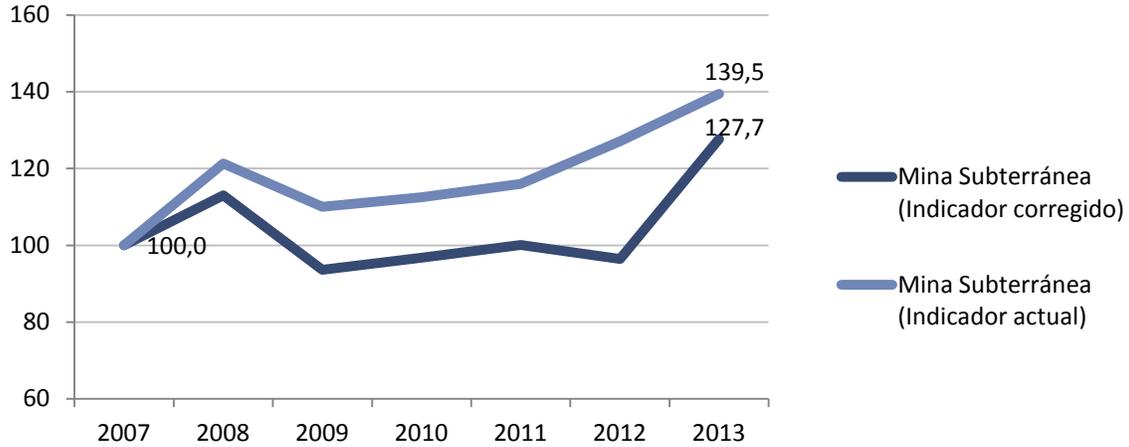
Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

La variación en el tiempo de los indicadores de consumo de electricidad actual y corregido en el proceso de extracción de mina subterránea son similares. Ambos indicadores presentan una tendencia al alza en tiempo, siendo de mayor grado para el caso del indicador actual (no corregido). Si el indicador actual tiene una variación de 39,5% en el periodo 2007 – 2013, para el caso del nuevo indicador corregido es de 27,7% en el mismo periodo (ver Figura 13). También es importante notar que mientras en el periodo 2009 – 2012 el indicador actual poseía una tasa de crecimiento promedio de un 4,7% anual, el indicador corregido presenta una tasa de crecimiento promedio de un 2,17% anual.



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería

Figura 13: Variación de indicadores de consumo de electricidad en Mina Subterránea (año base 2007=100 – País)

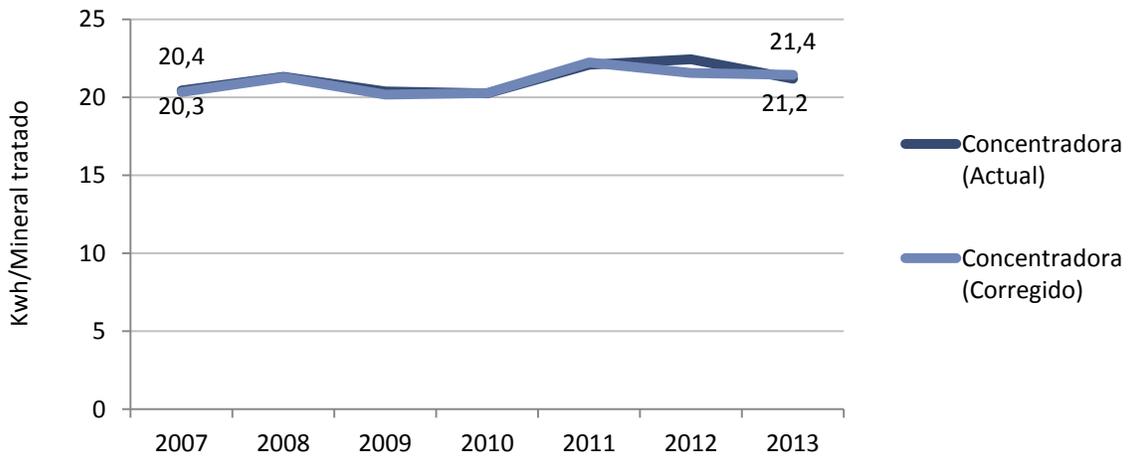


Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

5.3 Resultado indicador Planta Concentradora

El nuevo indicador para medir la intensidad de uso de energía en la planta Concentradora no incluye la energía utilizada en la planta de molibdeno⁵, como sí lo hace el actual indicador de Concentradora. Sin embargo, el consumo de Energía de las plantas de Molibdeno es considerado marginal en relación al consumo energético total del proceso. (Ver figura 14).

Figura 14: Indicadores de consumo de electricidad en planta concentradora



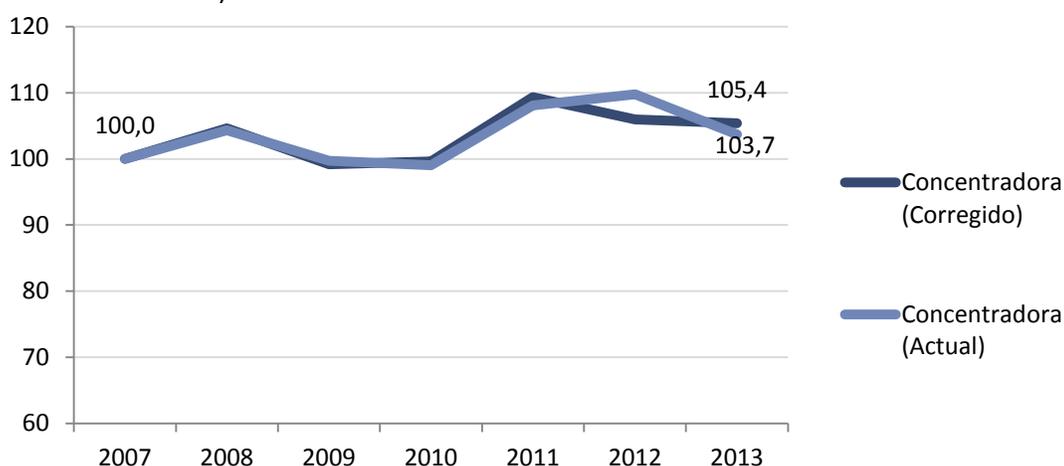
Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

⁵ Planta de flotación selectiva donde se recuperan los especímenes mineralógicos que contienen Molibdeno.



Al comparar la variación anual de los indicadores actual y corregido en la planta Concentradora, como se muestra en la figura 15, se aprecia una tendencia similar en su comportamiento. Esto se debe que el consumo energético de las plantas de molibdeno es marginal en el proceso de concentración, en comparación con los subprocesos de Chancado, Molienda y Flotación. En consecuencia, ambos indicadores tienen una tendencia y variación similar, aumentando su consumo unitario de energía en un 5,4% el actual indicador y un 3,7% el indicador corregido en el periodo 2007 – 2013.

Figura 15: Variación de indicadores de consumo de electricidad en planta Concentradora (año base 2007=100 – País)



Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

Se puede concluir que el nuevo indicador no entrega información adicional respecto de las variaciones en el consumo de energía, con respecto del actual indicador de consumo unitario reportado por Cochilco.

5.4 Resultado de indicadores de lixiviación, extracción por solventes y electroobtención

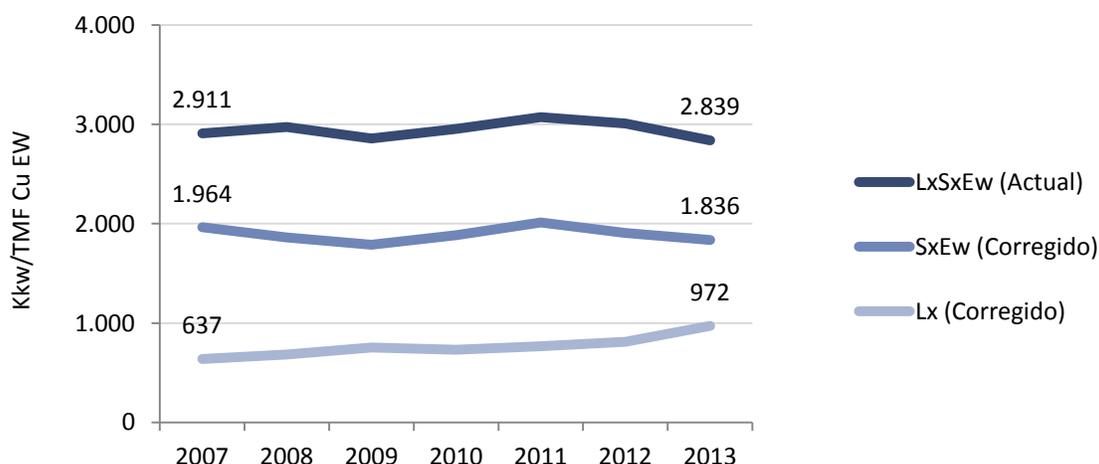
Al hacer una segmentación de los indicadores de intensidad de uso de energía en el caso de la producción de cobre a través de procesos hidrometalúrgicos, diferenciando por los subprocesos de lixiviación (Lx) y extracción por solventes-electroobtención (SXEW), se puede hacer un análisis más detallado respecto del consumo de energía en estos procesos.

Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería

En este sentido, es importante mencionar, que el indicador de intensidad de uso de electricidad en el subproceso de lixiviación no pudo ser construido de acuerdo a la propuesta original. Inicialmente, se había propuesto hacer una diferenciación entre la intensidad de uso de electricidad en Lixiviación ROM y HEAP. Lamentablemente, la recolección de información a través de la EMPAE 2013 no fue suficiente para la obtención de datos de manera representativa. Por defecto, se consideró un indicador que cuantifica el consumo energético del subproceso de lixiviación sin hacer diferenciaciones por tipo de mineral procesado.

De acuerdo a la figura 16, se visualiza una tendencia a la baja en el indicador de consumo de electricidad en el subproceso de SXEX, en donde el año 2007 se tenía un consumo de 1.964 Kwh por tonelada de cobre fino electroobtenido, mientras que este valor disminuye a 1.836 Kwh por tonelada de cobre fino electroobtenido en 2013. Esta disminución en el consumo energético puede ser reconocida como eficiencia energética operacional en las plantas de extracción por solventes y de electroobtención.

Figura 16: Indicadores de consumo eléctrico en proceso de recuperación de cobre utilizando hidrometalurgia. (Año base 2007=100 – País)



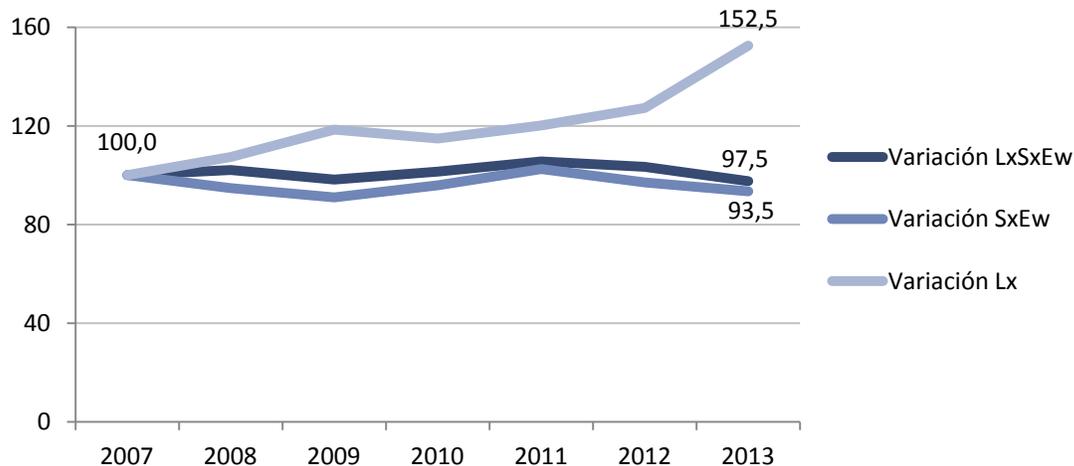
Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

Al analizar la variación de los indicadores en el tiempo llama la atención el aumento sufrido por el indicador de consumo de electricidad unitario del subproceso de lixiviación, el cual aumenta de un 52,5% en el periodo 2007 – 2013. Este aumento se debe principalmente al aumento del consumo de electricidad en este subproceso, motivado por el aumento de procesamiento de minerales de baja ley, el cual es desacoplado de la variación en la producción de cobre fino electroobtenido.



Por otro lado, el nuevo indicador propuesto mide el consumo de energía en las plantas de extracción por solventes y electro obtención disminuye su consumo unitario en 6,5% en el periodo 2007 – 2013. Su comportamiento en el tiempo, es muy similar al del actual indicador de variación en el consumo de electricidad del proceso de LXSXEW.

Figura 17: Variación de indicadores de consumo eléctrico en proceso de recuperación de cobre utilizando hidrometalurgia.



Fuente: Elaboración propia en base a encuesta de producción consumo de agua y energía, Cochilco, 2014.

El indicador que mide la intensidad de uso de energía en el proceso SXEW no posee variables exógenas que distorsionen su medición. Por este motivo, este indicador realiza buenas aproximaciones respecto de la medición de eficiencia energética en los casos de las plantas de extracción por solventes y electroobtención.

Sin embargo el indicador que mide la intensidad de uso de energía en el subproceso de lixiviación (LX), no es un buen indicador ya que se encuentra sesgado por la ley del mineral lixiviado. Por otro lado, si la unidad de medida física, para medir el consumo de energía unitario, fuese la cantidad de mineral lixiviado, entonces se tendría un indicador decreciente en el tiempo debido al aumento de la lixiviación mineral de baja ley en las faenas mineras del país.

Por el motivo antes expuesto se recomienda sistematizar, como una línea de trabajo permanente de COCHILCO, solo el indicador de consumo de energía unitaria para el caso del indicador del subproceso SXEW. El indicador que mide la intensidad de uso de la energía en la lixiviación (LX), de acuerdo a las medidas físicas utilizadas, no ha podido ser corregido dado que es dependiente de las leyes del mineral que procesado.



7. Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones del informe:

- Los indicadores de intensidad de uso de energía corregidos, propuestos en este informe, y los indicadores de intensidad de uso de energía actualizados anualmente por Cochilco tienen objetivos diferentes. Los primeros tienen el propósito de medir la Eficiencia Energética en procesos y subprocesos específicos de la minería, para lo cual su medición se independiza de sus variables exógenas. Por otro lado, los indicadores de intensidad de uso de energía de la minería actuales tienen por propósito el estudio y análisis del consumo real de energía por procesos mineros.
- Los indicadores de intensidad de uso de energía corregidos para los procesos de Transporte de material en Mina Rajo, Chancado primario en Mina Rajo, extracción de mineral en Mina Subterránea, procesamiento de minerales en Planta Concentradora y mineral procesado en SXEW, son capaces de medir la eficiencia energética en estos procesos.
- Los indicadores aquí propuestos son una herramienta indicativa respecto de la aplicación de medidas de eficiencia energética en aquellos procesos más relevantes que pueden generar un impacto significativo en el consumo de energía de la industria.
- Cuando se comparan los indicadores actuales y corregidos de intensidad de uso de energía, estos tienen una tendencia similar en el tiempo. Sin embargo, en general, las variaciones de los indicadores corregidos son menores.
- Los indicadores corregidos incluidos en este informe corresponden a los promedios ponderados por faena, lo que no es sinónimo de que todas las compañías tengan el mismo comportamiento en el consumo unitario de energía por procesos o subprocesos. Sin embargo, son fiel reflejo de la tendencia de la industria minera del cobre.
- Los indicadores de eficiencia energética propuestos en este informe se transformarán en una línea de trabajo permanente de Cochilco que será publicada anualmente, por lo cual la transferencia de información de producción y consumo de energía de las faenas mineras a través de la encuesta EMPAE es fundamental para la construcción de indicadores representativos e insesgados.



8. Referencias

1. Anónimo (ENAP – U. de Chile), Análisis comparativo sobre el uso eficiente de la energía en la minería de la APEC. - benchmarking de países de la APEC. Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile, diciembre de 2004
2. G.J.M. Phylipsen, Energy Efficiency Indicators Best practice and potential use in developing country policy making, Commissioned by the World Bank, Junio 2010
3. IEA, 2007d, Energy Balances of Non-OECD Countries, 2004-2005, IEA/OECD, Paris.
4. Patterson, G. Murray, What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues, Energy Policy. Vol. 24. Nº 5, pp. 377-390. 1996
5. Sathaye, Jayant, Energy Efficiency Indicators Methology Booklet, Lawrence Berkeley Laboratory, Agosto 2010
6. Adisa Azapagic, Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry, Journal of Cleaner Production 12 (2004) 639–662, 2004
7. Levesque M., Millar D., Paraszczak, Energy and mining – the home truths, Journal of Cleaner Production, 2014
8. Anónimo, Guía de Implementación ISO 50001 (Tercera Edición), Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2014.
9. Zeballos J., Betancour M., Actualización De Información Sobre El Consumo De Energía Asociado A La Minería Del Cobre Al Año 2012, Comisión Chilena del Cobre, Septiembre 2013.



9. Anexo A

En el anexo A se presentan las diferentes secciones del cuestionario que componen la encuesta EMPAE 2013; excluyendo la sección de consumo de agua por procesos. De esta manera, se presenta en la tabla 18 la sección de producción procesos, en la tabla 19 la sección de consumo de energía eléctrica, en la tabla 20 la sección de consumo de combustibles para el año 2013 y en la tabla 21 una sección de consumo de combustibles para transporte y lixiviación en el periodo 2007 – 2013.

Tabla 18 Encuesta EMPAE 2013 – Sección Producción por procesos

Mina rajo abierto	Unidad	2013	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Material Extraído	KTM							
Mineral extraído (a planta, lix., a stock pile, etc.)	KTM							
Lastre Extraído	KTM							
Razón Lastre/mineral								
Mineral extraído (a planta, lix., a stock pile, etc.)	%							
ley lastre	%							
			2007	2008	2009	2010	2011	2012
Material cargado por palas	KTM							
Distancia media equivalente de acarreo de mineral	Kms.							
Distancia media equivalente de acarreo de Lastre	Kms.							
Mina subterránea	Unidad	2013						
Mineral Extraído (a planta, lix., a stock pile, etc.)	KTM							
Ley del Mineral	%		2007	2008	2009	2010	2011	2012
Distancia media equivalente de acarreo de mineral	Kms							
Planta concentradora	Unidad	2013						
Mineral Procesado	TMS							
Concentrado Producido	TMS							
Ley de Cu del Mineral	%							
Ley de Cu del Concentrado	%							
% de recuperación en Concentración	%							
Índice de dureza del mineral procesado	kWh/t corta							
Cobre Fino Producido	TMF							
Capacidad nominal planta	TPD							
Días de operación	Días							
LXSXEW	Unidad	2013	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Mineral Lixiviable Tratado HEAP	KTM							
Mineral Lixiviable Tratado ROM	KTM							
Ley Cu Mineral Lixiviable HEAP	%							
Ley Cu Mineral Lixiviable ROM	%							
Recuperación en Lixiviación	%							
Producción de Cátodos SX-EW	TMF							
Consumo de ácido	Ton							
Capacidad nominal de nave EO	TMF							



Tabla 18 Encuesta EMPAE 2013 – Sección Producción por procesos (continuación)

Planta de Molibdeno	Unidad	2013
Volumen Molibdeno Total producido	TMF	
Producción Trióxido de Molibdeno	TMF	
Prod. de fino en concentrado Molibdeno	TMF	
Ley Mo del concentrado	%	
Recuperación Global Mo	%	
Fundición	Unidad	2013
Concentrado Procesado	Ton	
Concentrado Propio Fundido	Ton	
Concentrado Externo Fundido	Ton	
Ley del Concentrado		
Ley del Concentrado Propio Fundido	%	
Ley del Concentrado Externo Fundido	%	
Recuperación de Cu	%	
Producción Total de Cu Fundición	TMF	
Volumen de Blíster producido	TMF	
Volumen de Ánodos producidos	TMF	
Producción neta de Cu (producción total – recirculación)	TMF	
Producción Acido Sulfúrico	Ton	
Producción Oxígeno	m3	
Días de operación	Días	
Refinería	Unidad	2013
Producción Total de Cátodos ER	Ton	
Producción Total de Cátodos ER Propios	Ton	
Producción Total de Cátodos ER Externos	Ton	
Producción de barras anódicas	Ton	
Ley de Au en barro anódico	%	
Ley de Ag en barro anódico	%	
Días de operación	Días	



Tabla 19 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo eléctrico por procesos

ENERGÍA ELÉCTRICA – Procesos mineros (Kwh)	
Mina rajo abierto	2013
Perforación	
Tronadura	
Carguío	
Transporte	
Chancado Primario	
Otros	
Mina subterránea	2013
Perforación	
Tronadura	
Carguío	
Transporte	
Chancado Primario	
Otros	
Planta concentradora	2013
Plantas de chancado	
Molienda (tradicional y/o SAG)	
Flotación	
Planta de tratamiento de relaves	
Operación servicios aguas y recirculación	
Filtros	
Otros	
Planta molibdenita	2013
Producción Concentrado Molibdeno	
Planta de lixiviación	2013
Aglomeración	
Lixiviación ROM (LX)	
Lixiviación HEAP (LX)	
SXEW	
Otros	
Fundición	2013
Secado	
Fusión (hornos)	
Limpieza de escoria	
Conversión	
Pirorefinación (refino y moldeo)	
Planta de oxígeno	
Planta de aire y vapor	
Planta de ácido sulfúrico	
Otros	
Refinería	2013
Electrorefinación	
Otros	

2007	2008	2009	2010	2011	2012

2007	2008	2009	2010	2011	2012

2007	2008	2009	2010	2011	2012



Tabla 19 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo eléctrico por procesos (continuación)

ENERGÍA ELÉCTRICA – Otros (Kwh)	2013
Servicios	
Campamento	
Talleres	
Otros	
Agua desalinizada	
Plantas desalinizadoras	
Sistemas de impulsión	

ENERGÍA ELÉCTRICA – comprada vs. autogenerada (Kwh)	2013
Energía comprada	
Energía autogenerada	



Tabla 20 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo de combustibles por procesos durante el año 2013

	2013										
	Carbón (Kg)	Gasolina (m3)	Diesel (m3)	Enap 6 (TM)	Kerosene (m3)	Gas Licuado (Kg)	Gas Natural (m3)	Leña/Pellets/Astillas (Kg)	Butano (lts)	Nafta (m3)	Propano (m3)
MINA SUBTERRANEA											
Preparación											
Perforación											
Tronadura											
Extracción y Traspaso											
Chancado Mina											
Carguío y Transporte											
Otros											
SUB-TOTAL MINA SUBTERRANEA											
TRATAMIENTO MINERALES LIXIVIABLES											
Lixiviación											
Extracción por Solvente											
Electroobtención											
Otros											
SUB-TOTAL TRATAMIENTO MINERALES LIXIVIABLES											
CONCENTRADOR											
Plantas Chancado											
Molienda Tradicional											
Molienda S.A.G.											
Molienda Unitaria											
Concentración (Flotación)											
Planta Tratamiento Relaves											
Disposición Relaves											
Servicios Hidratación											
Operación Servicios Agua											
Filtros											
Planta Molibdenita											
Secado											
Otros											
SUB-TOTAL CONCENTRADOR											
FUNDICION											
Secado											
Calcinadores											
Convertidores Teniente											
Convertidores Pierce Smith											
Refino y Moldeo											
Hornos Escorias											
Plantas Oxígeno											
Servicios Aire/Vapor											
Otros											
SUB-TOTAL FUNDICION											



Tabla 20 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo de combustibles por procesos durante el año 2013 (continuación)

PLANTA ACIDO SULFURICO											
PLANTA POLVOS FUNDICION											
SERVICIOS	Carbón (Kg)	Gasolina (m3)	Diesel (m3)	Enap 6 (Tm)	Kerosene (m3)	Gas Licuado (Kg)	Gas Natural (m3)	Leña/Pellets/Astillas (kg)	Butano (lts)	Nafta (m3)	Propano (m3)
Suministros											
Servicios Producción											
Servicios a las Personas											
Servicios Mantención											
Recursos Hídricos											
Planta Tratamiento											
Otros											
SUB-TOTAL SERVICIOS											
(*) Incluir extracción, porteo y distribución											
GENERAL	Carbón (Kg)	Gasolina (m3)	Diesel (m3)	Enap 6 (Tm)	Kerosene (m3)	Gas Licuado (Kg)	Gas Natural (m3)	Leña/Pellets/Astillas (kg)	Butano (lts)	Nafta (m3)	Propano (m3)
Campamentos											
Otros											
SUB-TOTAL GENERAL											
TOTAL CONSUMO ANUAL											
Combustibles usados como Reactivos											



Tabla 21 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo de combustibles para procesos específicos en el periodo 2007 - 2013

	MINA RAJO	Carguío	Transporte	MINA SUBTERRANEA	Transporte	LXSXEW	Lixiviación ROM	Lixiviación HEAP	SXEW
2007	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)		Carbón (Kg)			
2007	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)		Gasolina (m3)			
2007	Diesel (m3)			Diesel (m3)		Diesel (m3)			
2007	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)		Enap 6 (m3)			
2007	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)		Kerosene (m3)			
2007	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)		Gas Licuado (Kg)			
2007	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)		Gas Natural (m3)			
2007	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)		Leña/ Pellets (Kg)			
2007	Butano (Its)			Butano (Its)		Butano (Its)			
2007	Nafta (m3)			Nafta (m3)		Nafta (m3)			
2007	Propano (m3)			Propano (m3)		Propano (m3)			
2008	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)		Carbón (Kg)			
2008	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)		Gasolina (m3)			
2008	Diesel (m3)			Diesel (m3)		Diesel (m3)			
2008	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)		Enap 6 (m3)			
2008	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)		Kerosene (m3)			
2008	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)		Gas Licuado (Kg)			
2008	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)		Gas Natural (m3)			
2008	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)		Leña/ Pellets (Kg)			
2008	Butano (Its)			Butano (Its)		Butano (Its)			
2008	Nafta (m3)			Nafta (m3)		Nafta (m3)			
2008	Propano (m3)			Propano (m3)		Propano (m3)			
2009	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)		Carbón (Kg)			
2009	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)		Gasolina (m3)			
2009	Diesel (m3)			Diesel (m3)		Diesel (m3)			
2009	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)		Enap 6 (m3)			
2009	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)		Kerosene (m3)			
2009	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)		Gas Licuado (Kg)			
2009	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)		Gas Natural (m3)			
2009	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)		Leña/ Pellets (Kg)			
2009	Butano (Its)			Butano (Its)		Butano (Its)			
2009	Nafta (m3)			Nafta (m3)		Nafta (m3)			
2009	Propano (m3)			Propano (m3)		Propano (m3)			
2010	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)		Carbón (Kg)			
2010	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)		Gasolina (m3)			



Tabla 21 Encuesta EMPAE 2013 – Sección de consumo de combustibles para procesos específicos en el periodo 2007 – 2013 (continuación)

2010	Diesel (m3)			Diesel (m3)				Diesel (m3)			
2010	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)				Enap 6 (m3)			
2010	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)				Kerosene (m3)			
2010	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)				Gas Licuado (Kg)			
2010	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)				Gas Natural (m3)			
2010	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)				Leña/ Pellets (Kg)			
2010	Butano (Its)			Butano (Its)				Butano (Its)			
2010	Nafta (m3)			Nafta (m3)				Nafta (m3)			
2010	Propano (m3)			Propano (m3)				Propano (m3)			
2011	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)				Carbón (Kg)			
2011	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)				Gasolina (m3)			
2011	Diesel (m3)			Diesel (m3)				Diesel (m3)			
2011	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)				Enap 6 (m3)			
2011	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)				Kerosene (m3)			
2011	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)				Gas Licuado (Kg)			
2011	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)				Gas Natural (m3)			
2011	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)				Leña/ Pellets (Kg)			
2011	Butano (Its)			Butano (Its)				Butano (Its)			
2011	Nafta (m3)			Nafta (m3)				Nafta (m3)			
2011	Propano (m3)			Propano (m3)				Propano (m3)			
2012	Carbón (Kg)			Carbón (Kg)				Carbón (Kg)			
2012	Gasolina (m3)			Gasolina (m3)				Gasolina (m3)			
2012	Diesel (m3)			Diesel (m3)				Diesel (m3)			
2012	Enap 6 (m3)			Enap 6 (m3)				Enap 6 (m3)			
2012	Kerosene (m3)			Kerosene (m3)				Kerosene (m3)			
2012	Gas Licuado (Kg)			Gas Licuado (Kg)				Gas Licuado (Kg)			
2012	Gas Natural (m3)			Gas Natural (m3)				Gas Natural (m3)			
2012	Leña/ Pellets (Kg)			Leña/ Pellets (Kg)				Leña/ Pellets (Kg)			
2012	Butano (Its)			Butano (Its)				Butano (Its)			
2012	Nafta (m3)			Nafta (m3)				Nafta (m3)			
2012	Propano (m3)			Propano (m3)				Propano (m3)			



10. Anexo B

En el Anexo B se presentan diferentes tablas, en donde se detalla la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para la construcción de los nuevos indicadores de intensidad de uso de energía corregido por variables estructurales de la minería por faena. Se debe mencionar además que el cálculo de los indicadores corregidos se realiza por faena, y el cálculo de los diferentes indicadores a nivel nacional se efectúa ponderando según producción los indicadores unitarios de cada faena.

Tabla 22 Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en el transporte de material.

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">COMBUSTIBLES</td></tr> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Mina rajo abierto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Transporte</td><td style="text-align: center;">Kwh</td></tr> </table>	COMBUSTIBLES		Mina rajo abierto		Transporte	Kwh	$\frac{\text{Energía combustibles (Kwh)}}{\text{Mat. extraído (TM)} \cdot \text{Dist. material (Km Eq)}}$	
COMBUSTIBLES								
Mina rajo abierto								
Transporte	Kwh							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">PRODUCCIÓN</td></tr> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Mina rajo abierto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Material Extraído</td><td style="text-align: center;">KTM</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Distancia media equivalente de acarreo de mineral</td><td style="text-align: center;">Km</td></tr> </table>	PRODUCCIÓN		Mina rajo abierto		Material Extraído	KTM	Distancia media equivalente de acarreo de mineral	Km
PRODUCCIÓN								
Mina rajo abierto								
Material Extraído	KTM							
Distancia media equivalente de acarreo de mineral	Km							

Tabla 23 Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en el chancado primario de mineral.

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">ENERGÍA ELÉCTRICA</td></tr> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Mina rajo abierto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Chancado Primario</td><td style="text-align: center;">Kwh</td></tr> </table>	ENERGÍA ELÉCTRICA		Mina rajo abierto		Chancado Primario	Kwh	$\frac{\text{Electricidad Chancado Primario (Kwh)}}{\text{Material Cargado (TM)}}$
ENERGÍA ELÉCTRICA							
Mina rajo abierto							
Chancado Primario	Kwh						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">PRODUCCIÓN</td></tr> <tr><td colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Mina rajo abierto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Material cargado por palas</td><td style="text-align: center;">KTM</td></tr> </table>	PRODUCCIÓN		Mina rajo abierto		Material cargado por palas	KTM	
PRODUCCIÓN							
Mina rajo abierto							
Material cargado por palas	KTM						



Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería**Tabla 24** Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en la planta concentradora.

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ENERGÍA ELÉCTRICA</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Mina Subterránea</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Perforación</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Tronadura</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Carguío</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Transporte</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Chancado Primario</td> <td>Kwh</td> </tr> </tbody> </table>	ENERGÍA ELÉCTRICA		Mina Subterránea		Perforación	Kwh	Tronadura	Kwh	Carguío	Kwh	Transporte	Kwh	Chancado Primario	Kwh	$\frac{\text{Electricidad extracción mineral (Kwh)}}{\text{Mineral extraído (TM)}}$
ENERGÍA ELÉCTRICA															
Mina Subterránea															
Perforación	Kwh														
Tronadura	Kwh														
Carguío	Kwh														
Transporte	Kwh														
Chancado Primario	Kwh														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">PRODUCCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Mina Subterránea</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Material Extraído</td> <td>KTM</td> </tr> </tbody> </table>	PRODUCCIÓN		Mina Subterránea		Material Extraído	KTM									
PRODUCCIÓN															
Mina Subterránea															
Material Extraído	KTM														

Tabla 25 Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en la planta concentradora.

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ENERGÍA ELÉCTRICA</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Plantas Concentradoras</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Molienda (tradicional y/o SAG)</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Flotación</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Planta de tratamiento de relaves</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Operación servicios aguas y recirculación</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Filtros</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>Kwh</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>Kwh</td> </tr> </tbody> </table>	ENERGÍA ELÉCTRICA		Plantas Concentradoras		Molienda (tradicional y/o SAG)	Kwh	Flotación	Kwh	Planta de tratamiento de relaves	Kwh	Operación servicios aguas y recirculación	Kwh	Filtros	Kwh	Otros	Kwh	Total	Kwh	$\frac{\text{Electricidad Total Concentradora (Kwh)}}{\text{Mineral Procesado (TM)}}$
ENERGÍA ELÉCTRICA																			
Plantas Concentradoras																			
Molienda (tradicional y/o SAG)	Kwh																		
Flotación	Kwh																		
Planta de tratamiento de relaves	Kwh																		
Operación servicios aguas y recirculación	Kwh																		
Filtros	Kwh																		
Otros	Kwh																		
Total	Kwh																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">PRODUCCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Concentradora</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mineral Procesado</td> <td>TMS</td> </tr> </tbody> </table>	PRODUCCIÓN		Concentradora		Mineral Procesado	TMS													
PRODUCCIÓN																			
Concentradora																			
Mineral Procesado	TMS																		



Tabla 26 Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en subproceso de lixiviación

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">ENERGÍA ELÉCTRICA</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Planta de lixiviación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Aglomeración</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Lixiviación ROM + HEAP (LX)</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Subtotal lixiviación</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> </tbody> </table>	ENERGÍA ELÉCTRICA		Planta de lixiviación		Aglomeración	Kwh	Lixiviación ROM + HEAP (LX)	Kwh	Subtotal lixiviación	Kwh	$\frac{\text{Electricidad Lixiviación (Kwh)}}{\text{Cátodos EO (TMF)}}$
ENERGÍA ELÉCTRICA											
Planta de lixiviación											
Aglomeración	Kwh										
Lixiviación ROM + HEAP (LX)	Kwh										
Subtotal lixiviación	Kwh										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">PRODUCCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">LXSXEW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Producción de Cátodos EO</td> <td style="text-align: center;">TMF</td> </tr> </tbody> </table>	PRODUCCIÓN		LXSXEW		Producción de Cátodos EO	TMF					
PRODUCCIÓN											
LXSXEW											
Producción de Cátodos EO	TMF										

Tabla 27 Se muestra la información utilizada de la encuesta EMPAE 2013 para construcción de indicador de intensidad de uso energía en subproceso de SXEW

Información de la encuesta EMPAE para la construcción del indicador corregido	Indicador de intensidad de uso corregido										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">ENERGÍA ELÉCTRICA</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Planta de lixiviación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">SxEw</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Otros</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Subtotal SxEw</td> <td style="text-align: center;">Kwh</td> </tr> </tbody> </table>	ENERGÍA ELÉCTRICA		Planta de lixiviación		SxEw	Kwh	Otros	Kwh	Subtotal SxEw	Kwh	$\frac{\text{Electricidad SxEw (Kwh)}}{\text{Cátodos EO (TMF)}}$
ENERGÍA ELÉCTRICA											
Planta de lixiviación											
SxEw	Kwh										
Otros	Kwh										
Subtotal SxEw	Kwh										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">PRODUCCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">LXSXEW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Producción de Cátodos EO</td> <td style="text-align: center;">TMF</td> </tr> </tbody> </table>	PRODUCCIÓN		LXSXEW		Producción de Cátodos EO	TMF					
PRODUCCIÓN											
LXSXEW											
Producción de Cátodos EO	TMF										



Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

Sergio Verdugo Montenegro

Analista Minero

Vicente Pérez Vidal

Coordinador de Estrategias y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Noviembre / 2014

