



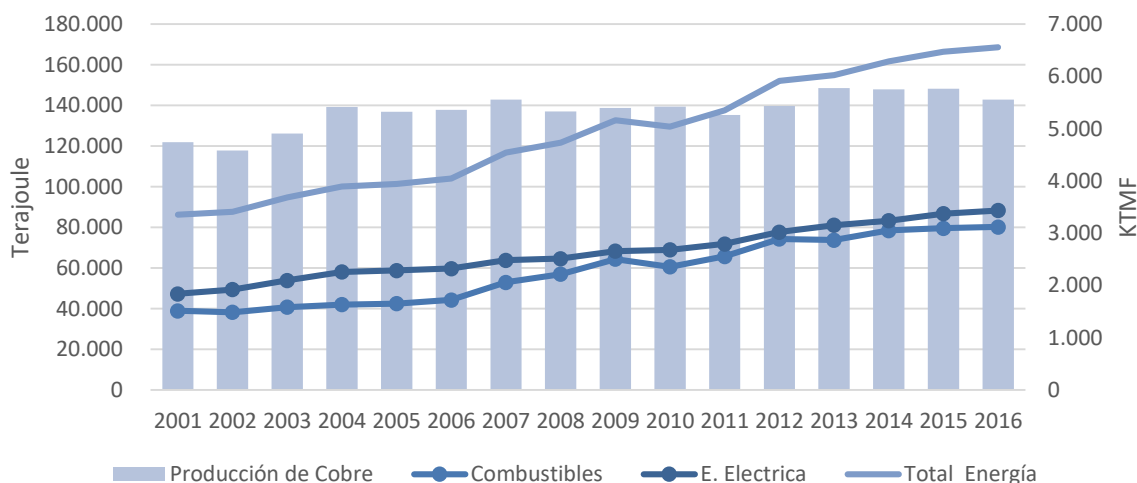
Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2016

DEPP 12/2017

Resumen Ejecutivo

Este documento constituye un trabajo de actualización, al año 2016, de los consumos energéticos, combustibles y energía eléctrica, del sector minería para el período 2001 – 2016. Cumpliendo con el objetivo de contar con información actualizada, que permita visualizar la forma cómo van evolucionando a través de los años los consumos energéticos del sector, producto de cambios tecnológicos, cambios en la cartera de productos comerciales u otros factores. Esto ha sido posible gracias a la amplia colaboración de las empresas que entregaron sus antecedentes para la elaboración de este trabajo y que permitieron contar con información equivalente al 99,3% de la producción de cobre de Chile del año 2016.

En el año 2016 para una producción de 5,6 millones de toneladas de cobre fino contenido, la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 168.572 TJ, lo que representa un 12% del total de energía consumida en el país, siendo un 52,4 de tipo eléctrico.



Las principales fuentes de abastecimiento energético de la minería son por un lado la energía eléctrica de los Sistemas Interconectados del Norte Grande (SING) y Central (SIC), mientras que el uso de combustibles es altamente concentrado en el Diesel con un 88,8%, y en menor medida el Gas Natural (5,7%) y Enap 6 (5,7%), siendo marginal la participación de los otros combustibles como el carbón, kerosene, butano, gas licuado y gasolinas.

Los resultados de este trabajo evidencian que la minería del cobre continúa enfrentando una situación de cambios estructurales, que aumentan los requerimientos energéticos en el proceso productivo. El envejecimiento de las minas, la caída de las leyes de cobre y la tendencia hacia la producción de concentrados, provocó un nuevo aumento del consumo de energía total, en 2016, equivalente a un 1,4% interanual, a pesar de que la producción nacional de cobre mina disminuyó en más de 220 mil toneladas de cobre fino.

El consumo anual de energía por parte de la minería del cobre pasó de 166.324 a 168.572 TJ en el último año, siendo este el menor aumento nominal de energía desde 2005, confirmando la ralentización del aumento del consumo energético desde 2013, año que registró el nivel de producción de cobre mina más alto de los últimos 15 años.

Específicamente para uso de los combustibles, ya desde el año 2013 se observa cierto grado de estabilización en su uso, el cual en 2016 alcanza los 80.256 TJ, representando el 47,6% del total de uso de energía de la minería del cobre y solo 0.8% superior al registrado en el 2015.

En cuanto a la energía eléctrica el año 2016 la minería del cobre consumió un total de 88.315 TJ. Este consumo corresponde a un incremento de 1,8% respecto de 2015. Comparando con el año 2001 se observa que el consumo de electricidad por parte de la minería del cobre aumentó un 86,8%, consecuencia de un ritmo de crecimiento del consumo de 4,3% anual. El constante crecimiento nominal del consumo eléctrico, viene dado principalmente por el aumento de capacidad de procesamiento de concentración a nivel nacional y del aumento del consumo eléctrico de los sistemas de impulsión y desalación de agua de mar a las faenas.

Dado lo anterior el crecimiento del consumo de energía eléctrica para transporte y desalación de agua en la minería del cobre crece a ritmo del 20% anual desde 2013, alcanzando los 2.726 TJ de consumo, un 39% del total de requerimiento eléctrico en servicios.

Finalmente, El consumo de electricidad en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) fue de 50.577 TJ en 2016, registrando la primera baja nominal de consumo desde 2010, equivalente al 0,9%. Situación que contrasta con lo registrado para el consumo eléctrico provisto desde el Sistema Interconectado Central (SIC), el cual amentó un 5,9%, alcanzando los 37.737 TJ en 2016.



Índice

| | |
|---|----|
| Resumen Ejecutivo | I |
| 1. Introducción | 6 |
| 2. Metodología | 7 |
| 2.1. Información general y encuesta | 7 |
| 2.2. Análisis de los datos..... | 9 |
| 3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional..... | 12 |
| 3.1. Consumos totales de energía de la minería del cobre | 12 |
| 3.2. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre | 13 |
| 3.3. Consumo de Energía por Área de Producción | 14 |
| 3.4. Participación del consumo de la energía de la minería del cobre en el consumo de energía a nivel nacional | 15 |
| 3.5. Consumos de Energía por Región | 17 |
| 4. Consumo de combustibles de la minería del cobre | 18 |
| 5. Consumo eléctrico de la minería del cobre..... | 22 |
| 5.1. Consumo eléctrico de la minería del cobre a nivel nacional | 22 |
| 5.2. Consumo eléctrico de la minería del cobre en el sistema interconectado del norte grande y en el sistema interconectado central | 25 |
| 6. Comentarios finales..... | 27 |
| 7. Glosario..... | 28 |



Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre | 8 |
| Figura 2: Tipo de energía utilizada en Minería..... | 8 |
| Figura 3 Consumos Totales de Energía de la Minería del Cobre vs Producción de Cobre Fino | 12 |
| Figura 4 Consumo y participación de energía según tipo en la minería del cobre, 2001 – 2016 | 13 |
| Figura 5 Evolución del consumo unitario de energía en la producción de fino en Chile y evolución de las leyes promedio de mineral | 14 |
| Figura 6 Consumo de total de Energía por Áreas de Producción en la minería del cobre 2001-2016 | 15 |
| Figura 7 Porcentaje de Consumo de Combustibles vs Energía Eléctrica por Áreas en el 2016 | 15 |
| Figura 8 Participación del consumo sectorial de energía en el Consumo Nacional 2015..... | 16 |
| Figura 9 Participación del consumo eléctrico y de derivados del petróleo sectorial de energía en el Consumo Nacional 2015 | 16 |
| Figura 11 Consumo de energía por Región en la minería del cobre, 2016 | 17 |
| Figura 11 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 - 2016..... | 18 |
| Figura 12 Participación de Principales Combustibles en el Consumo Total de Combustibles en la Minería en los años 2001 y 2016 | 19 |
| Figura 13 Consumo de combustibles por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016 | 20 |
| Figura 14 Participación de los procesos mineros en el consumo total de energía en base a combustibles, 2001 – 2016 | 20 |
| Figura 15 Consumo unitario de combustibles por tonelada de cobre fino contenido y por tonelada de mineral procesado | 21 |
| Figura 16 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001 - 2016..... | 22 |
| Figura 17 Consumo de electricidad por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016 | 23 |
| Figura 18 Consumo de energía eléctrica de sistemas de desalación e impulsión de agua de mar y composición del proceso servicios 2016..... | 23 |
| Figura 19 Participación de los procesos mineros en el consumo total de electricidad, 2001 – 2016 | 24 |
| Figura 20 Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido y por tonelada de mineral procesado | 25 |
| Figura 21 Evolución del consumo de electricidad por procesos en SIC y SING..... | 26 |
| Figura 22 Participación del consumo energía eléctrica minería del cobre en sistemas SING y SIC 2016 | 26 |



Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Coeficientes de conversión de unidades físicas de combustibles a energía | 9 |
| Tabla 2 Cartera de Productos Comerciales de Cobre en Chile..... | 24 |



1. Introducción

La Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) reporta anualmente el consumo de energía de la minería del cobre a través de las *Estadísticas de consumo de energía del cobre*, publicadas en la página web <http://www.cochilco.cl/estadisticas/energia.asp> y a través del presente informe, enmarcado dentro de una línea de trabajo permanente. En este sentido, este informe tiene por objetivo analizar el consumo global de combustibles y electricidad incurridos por la minería del cobre, así como también un análisis y evolución de sus consumos unitarios.

Este año se incorporaron al análisis los datos de varias empresas de la mediana minería, con lo cual se tiene procesada la información de 56 operaciones, incluidas también fundiciones y refinерías existentes. Los datos de consumo energético, así como los de producción, son solicitados a través de la Encuesta Minera de *Producción, Agua y Energía (EMPAE)*, la cual es entregada a Cochilco durante los meses de marzo y abril de cada año.

Estos datos son utilizados para determinar el consumo de electricidad de la minería a nivel nacional, con revisiones particulares de cada proceso y sistema de suministro. Adicionalmente, se analiza el consumo de combustibles total y por procesos en la minería del cobre. Por último, los datos de producción de cobre fino y material procesado, en los diferentes procesos de la minería, se utilizan para determinar los coeficientes unitarios de consumo de energía, electricidad y combustibles, en los diferentes procesos.

Por lo tanto, para atender este objetivo, el informe en su sección 2 presenta la metodología usada en el informe, exponiendo el alcance de la encuesta y el tratamiento de los datos. Luego, en la sección 3, se muestran los datos agregados de consumo de energía a nivel nacional de la minería del cobre a nivel global y unitario. Así mismo, en la sección 4, se presentará un análisis de consumo de energía en base a combustibles por proceso y a nivel unitario, para luego en el capítulo siguiente, revisar de forma similar el comportamiento del consumo eléctrico. Finalmente en la sección 6 se entregan comentarios finales del informe.



2. Metodología

La metodología se puede resumir en dos partes. Primero, se consultan datos de producción, consumo de energía y agua por proceso minero a las principales faenas operativas que se encuentran dentro de la cadena principal de valor de la minería. Segundo, en base a la información suministrada por las operaciones mineras se determinan los consumos globales y unitarios de energía de electricidad y combustibles por procesos a nivel nacional. La metodología puede resumirse en los siguientes pasos:

- Se consultan los datos directamente a las empresas mediante la “Encuesta de producción, energía y recursos hídricos”.
- En base a la información suministrada por las empresas mineras, se determinan los consumos y los respectivos coeficientes unitarios de energía. Para el país se calculan tanto para combustibles como energía eléctrica, detallando según sistema interconectado para esta última.
- Los consumos de energía se presentan en terajoules (TJ) y los consumos unitarios en megajoules divididos en toneladas métricas (MJ/TM).

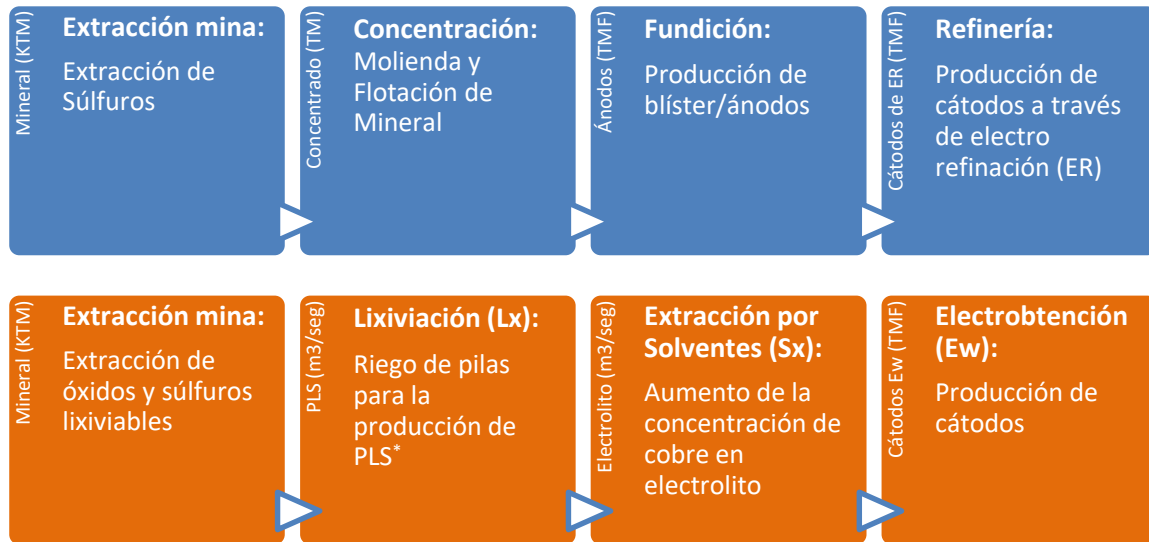
2.1. Información general y encuesta

Se identifican dos líneas de producción de cobre de acuerdo al mineral procesado. Primero, se identifica el procesamiento de minerales sulfurados, los cuales siguen una línea de producción de flotación, concentración. Por otro lado, los minerales oxidados, y algunas especies minerales sulfuradas, siguen una línea de lixiviación o de hidrometalurgia para la obtención de cobre.

Los principales procesos productivos de los minerales sulfurados son los de extracción mina, concentración, fundición y refinación. Por otro lado, las principales procesos involucrados en la extracción de cobre desde minerales oxidados son: extracción mina, lixiviación, extracción por solventes y electro obtención. Adicionalmente, en la Figura 1, se muestran de manera vertical en cada una de las casillas el producto, y sus respectivas unidades, de cada uno de los procesos.

Aunque no se muestra en la Figura 1, se reconoce el proceso de Servicios, que como se indica en la terminología, corresponde a la suma de aquellas actividades que no se encuentran incluidas dentro de los procesos de la cadena de valor principal, pero que son necesarias para llevar a cabo la producción minera. En este ítem se encuentra contemplado el consumo de energía debido a la impulsión y desalación de agua.

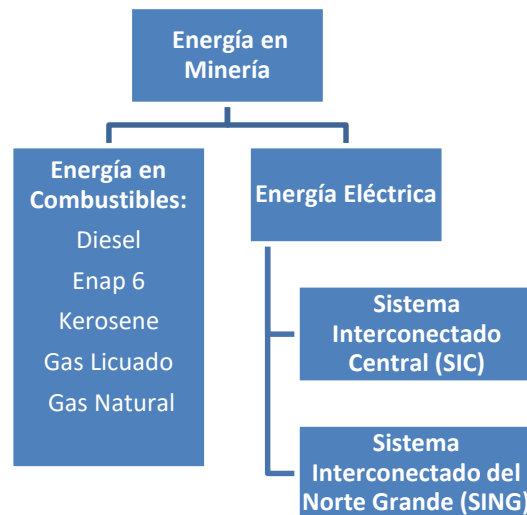


Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre

* Pregnant Leach Solution (PLS)

Fuente: Elaborado por Cochilco

Las principales fuentes de abastecimiento energético de la minería son la electricidad de los sistemas interconectados y los combustibles. Se identifican los sistemas interconectados del norte grande (SING) y central (SIC). En el presente informe se reconoce la energía utilizada en combustibles a través del uso de: Carbón, Gasolina, Diesel, Enap 6, Kerosene, Gas Licuado, Gas Natural, Leña y Butano.

Figura 2: Tipo de energía utilizada en Minería

Fuente: Elaborado por Cochilco

La información para determinar los consumos de energía se efectúan a través de la Encuesta Minera de Producción, agua y energía (EMPAE). La EMPAE recoge información de producción de los principales procesos productivos, identificando los insumos minerales, así como también identifica sus productos y sus principales

características. Por ejemplo, en el caso de extracción mina, se reportan las cantidades, en kilo toneladas métricas, de mineral y lastre extraído y sus respectivas leyes minerales; así también, en el caso de la concentración de mineral se consulta el mineral procesado y la cantidad de concentrado producido y sus respectivas leyes. Los diferentes procesos productivos se asocian a preguntas referentes a las cantidades de energía eléctrica consumida, cantidades de combustibles (en unidades físicas, por ejemplo m³ de diesel) y el agua total consumida y reciclada por procesos.

El año 2016 se encuestaron un total de 56 operaciones mineras, entre las que se encuentran minas, fundiciones y refinerías, las que representan un 99,3% de la producción de cobre fino a nivel nacional. Lo anterior corresponde al porcentaje más alto de cobertura alcanzado desde la creación de la EMPAE, gracias al consolidado compromiso de la gran minería y a la profundización de los vínculos con la mediana minería del cobre.

Las tablas con información detallada que son base para los cálculos, gráficos y análisis para este informe se encuentran disponibles en la página web de Cochilco (<http://www.cochilco.cl>) en la sección Estadísticas, Energía y GEI.

2.2. Análisis de los datos

En el caso de los combustibles, primero se deben transformar las unidades físicas consumidas reportadas en la encuesta a unidades energéticas; en este caso megajoule. Cada combustible reportado en las encuestas sobre el su consumo en las faenas mineras es transformado a unidades equivalentes energéticas según la Tabla 1 que considera el estado del arte de la tecnología dentro de la industria minera y factor energético de los combustibles.

Tabla 1 Coeficientes de conversión de unidades físicas de combustibles a energía

| Combustible | Unidad | Cantidad | Energía Útil (Megajoule, MJ) |
|-------------|--------|----------|---------------------------------|
| Carbón | Kg | 1 | 29 |
| Gasolina | M3 | 1 | 34.208 |
| Diesel | M3 | 1 | 38.309 |
| Enap 6 | t | 1 | 43.932 |
| Kerosene | M3 | 1 | 37.618 |
| Gas Licuado | Kg | 1 | 51 |
| Gas Natural | M3 | 1 | 39 |
| Leña | Kg | 1 | 15 |
| Butano | lts | 1 | 29 |

Fuente: Elaborado por Cochilco

A continuación se presentan los principales indicadores calculados para el caso de consumos de energía a través de combustibles y de electricidad.

2.2.1. Combustibles:

La energía de combustibles a nivel nacional corresponde a la sumatoria del consumo de las diferentes faenas consideradas en este informe, como se muestran en (3.1)



$$\text{Energía Combustibles} = \sum_i \text{Energía Combustibles consumida}_i \text{ (Petajoules)} \quad (3.1)$$

Donde i corresponde a faena minera.

El consumo unitario de combustible medido como la energía usada en el procesamiento de una tonelada de cobre fino contenido por procesos por faena se calcula como: el consumo de combustibles transformado a unidades energéticas dividido por el cobre fino contenido en el producto de dicho proceso, como se muestra en (3.2). Para los cálculos de los consumos unitarios de combustible por tonelada de cobre fino a nivel nacional por proceso, se considera que los consumos unitarios por faena sean ponderados de acuerdo a su aporte de cobre fino al total nacional según el proceso en cuestión como se muestra en (3.3).

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino}_{ij} = \frac{\text{Energía Combustible consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Cobre fino contenido en producto, proceso}_{ij} \text{ (TMF)}} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.2)$$

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino}_{ij} \times \frac{\text{Cu Fino en Producto}_{ij}}{\text{Cu Fino en Producto}_j} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.3)$$

Donde i corresponde a faena minera, mientras que j corresponde a los diferentes procesos productivos.

Para el caso de los consumos unitarios de energía en combustibles según el material procesado se efectúa primero el cálculo del consumo unitario por faena, tomando la energía en combustibles utilizada en los procesos dividido por el material total procesado, como se muestra en (3.4). Para efectuar el cálculo del consumo unitario de combustibles por material procesado a nivel nacional, los valores unitarios son ponderados de acuerdo a la participación del material procesado por faena sobre el total nacional procesado en un proceso específico como se muestra en (3.5).

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Material}_{ij} = \frac{\text{Energía Combustible consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Material procesado, proceso}_{ij} \text{ (Ton.métricas de material)}} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.4)$$

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Material} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Comb. x Material}_{ij} \times \frac{\text{Material procesado}_{ij}}{\text{Material procesado}_j} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.5)$$

Donde i corresponde a faena minera, mientras que j corresponde a los diferentes procesos productivos.

2.2.2. Energía Eléctrica:

La metodología utilizada para efectuar el cálculo de los indicadores de consumo de electricidad a nivel global y unitario se presentan en (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) y (3.10), siguiendo la misma nomenclatura presentada anteriormente.

$$\text{Energía Electricidad} = \sum_i \text{Energía Electricidad consumida}_i \text{ (Petajoules)} \quad (3.6)$$



$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino}_{ij} = \frac{\text{Energía Electricidad consumida}_{ij} (MJ)}{\text{Cobre fino contenido en producto, proceso}_{ij} (TMF)} (MJ/TMF) \quad (3.7)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino}_{ij} \times \frac{\text{Cu Fino en Producto}_{ij}}{\text{Cu Fino en Producto}_j} (MJ/TMF) \quad (3.8)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Material}_{ij} = \frac{\text{Energía Electricidad consumida}_{ij} (MJ)}{\text{Material procesado, proceso}_{ij} (\text{Ton. métricas de material})} (MJ/TM) \quad (3.9)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Material} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Elec. x Material}_{ij} \times \frac{\text{Material procesado}_{ij}}{\text{Material procesado}_j} (MJ/TM) \quad (3.10)$$



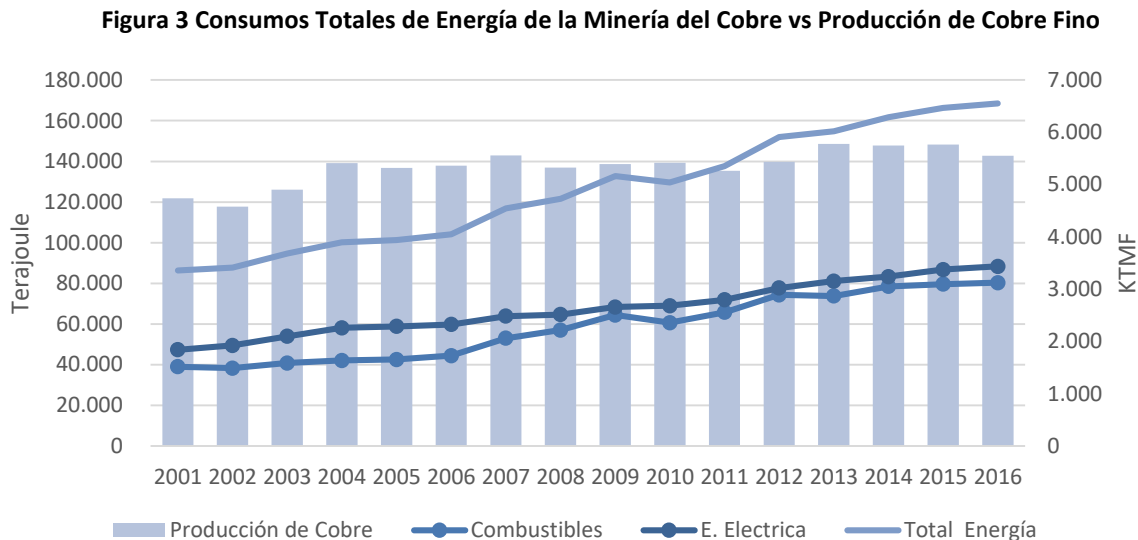
3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional

En el siguiente capítulo se indican los resultados de los consumos energéticos estimados para la minería del cobre en Chile.

3.1. Consumos totales de energía de la minería del cobre

Durante el año 2016 se registró un aumento del consumo de energía total por parte de la minería del cobre equivalente a un 1,4% respecto del año 2015. Sin embargo, la producción nacional de cobre mina disminuyó en más de 220 mil toneladas de cobre fino, debido importantes recortes de producción de faenas como Escondida, Anglo American Sur y El Abra, entre otras.

El consumo energético total en la minería del cobre aumentó de 166.324 a 168.572 Terajoules en el último año, registrando el menor aumento nominal de energía desde 2005, y confirmando la ralentización del aumento del consumo energético desde 2013, año que registró el nivel de producción de cobre mina más alto de los últimos 15 años. Ver Figura 3.



Fuente: Elaborado por Cochilco

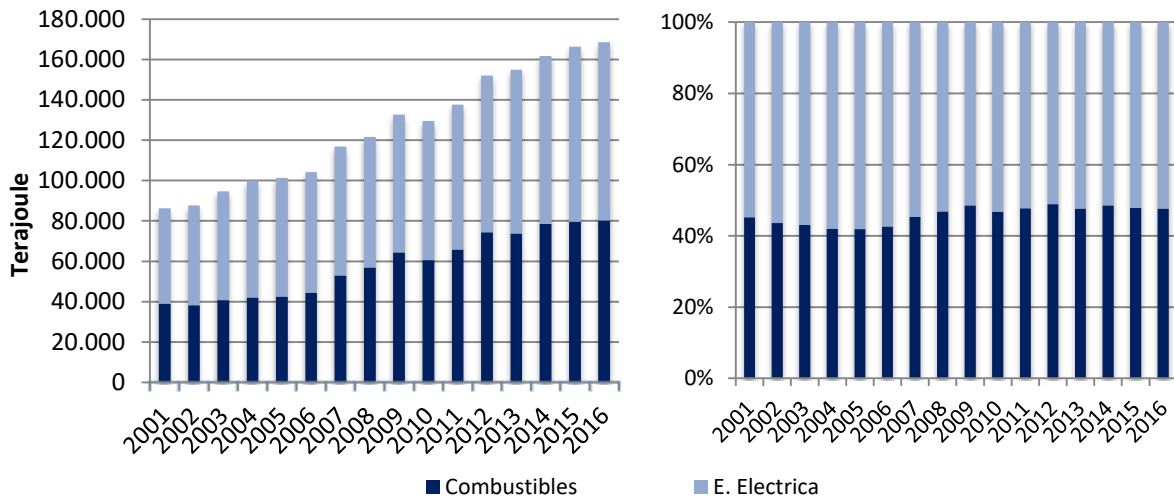
El coeficiente de correlación entre producción y consumo de energía es de 0,79 confirmando la relación entre ambas variables. Sin embargo, en los últimos años se hace visible el desacople entre las mismas, pues a pesar de que la producción de mineral se mantiene a niveles estables en torno a los 5,7 millones de toneladas en el periodo 2013 – 2016, el consumo energético sigue creciendo a un promedio de 2,63% anual. Este aumento en la intensidad de uso de energía por parte de la minería del cobre, se puede deber principalmente a cambios estructurales en distintas fases del proceso de explotación.

Por un lado, la ley de mineral promedio del país, nuevamente presentó una baja respecto del año previo, situándose en 0,65% en 2016, ésta baja confirma una tendencia evidente desde 2001, desde entonces a la fecha, las leyes de mineral disminuyen en promedio 3,2% por año. Por otro lado, también fomentan la mayor intensidad de uso de energía, el aumento de dureza de la roca, aumento de las distancias de acarreo y

cambios en la cartera de productos comerciales, la cual continúa su tendencia a la mayor producción de concentrados de cobre.

En la Figura 4, se presenta el consumo de energía segregado por consumo de electricidad y combustibles y su participación en el consumo total de energía de la minería del cobre. Entre los años 2015 y 2016 la participación del consumo de energía eléctrica sobre el consumo total pasa de 52,1% a 52,4%, aumentando su participación relativa por tercer año consecutivo.

Figura 4 Consumo y participación de energía según tipo en la minería del cobre, 2001 – 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

El aumento de consumo nominal de energía eléctrica tiene dos líneas argumentativas, que además de ayudar a comprender la situación actual consumo eléctrico, permite intuir un comportamiento sostenidamente alcista de cara al futuro. Por un lado, el 20% de los 1600 TJ de aumento nominal del consumo eléctrico esta explicado por el aumento de consumo eléctrico en sistemas de impulsión y desalación de agua de mar. Por otro lado, el nivel de tratamiento de mineral en plantas concentradoras aumentó en 12,9% el año 2016 respecto del año 2015, proceso que utiliza un 97,8% de energía eléctrica.

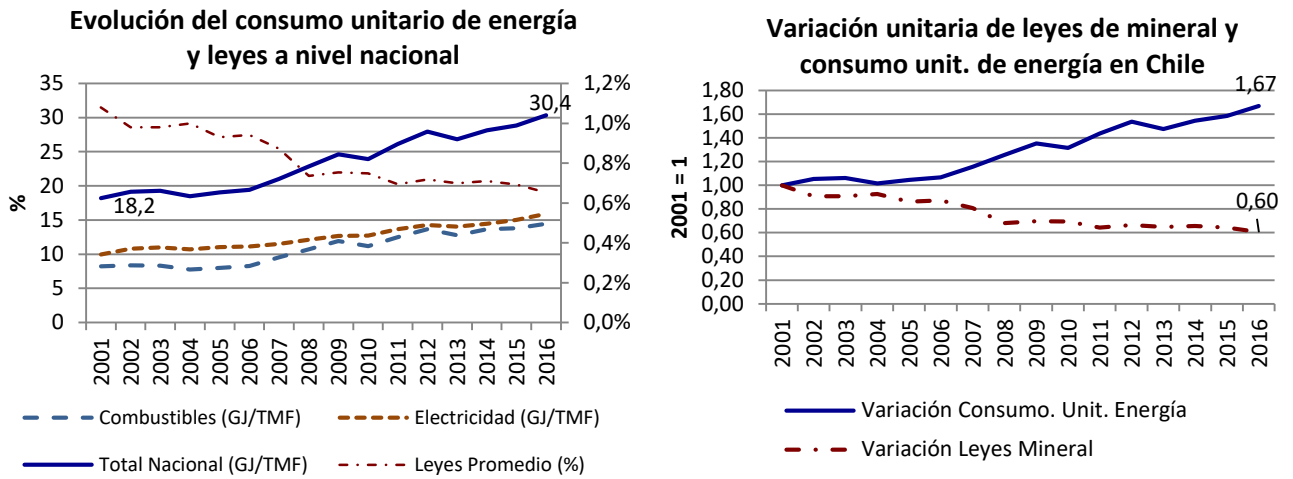
3.2. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre

El consumo unitario de energía es una medida útil para dimensionar la intensidad de uso de energía por tonelada de cobre fino producido. Esta medida, a pesar de no corregir por los cambios estructurales antes mencionados, permite analizar la tendencia del consumo de energía en la producción minera. Es así, como para el año 2016 se necesitaron en promedio 30,4 GJ para producir una tonelada de cobre fino, un 5,5% más que el año anterior y un 66.8% más de lo que se necesitaba en 2001.

El aumento agregado se distribuye similarmente entre energía eléctrica y de combustibles. El consumo de energía en base a combustibles para producir una tonelada de cobre fino aumentó un 4,6% y continuó con su tendencia alcista, debido principalmente al mayor consumo de combustibles en el transporte de mineral desde la mina rajo en minas de mayor edad y con cada vez mayores distancias de acarreo. El consumo unitario eléctrico por su parte, pasó de 15,0 GJ/TMF en 2015 a 15,9 GJ/TMF en 2016, determinado fundamentalmente por el aumento del consumo en la planta concentradora.



Figura 5 Evolución del consumo unitario de energía en la producción de fino en Chile y evolución de las leyes promedio de mineral



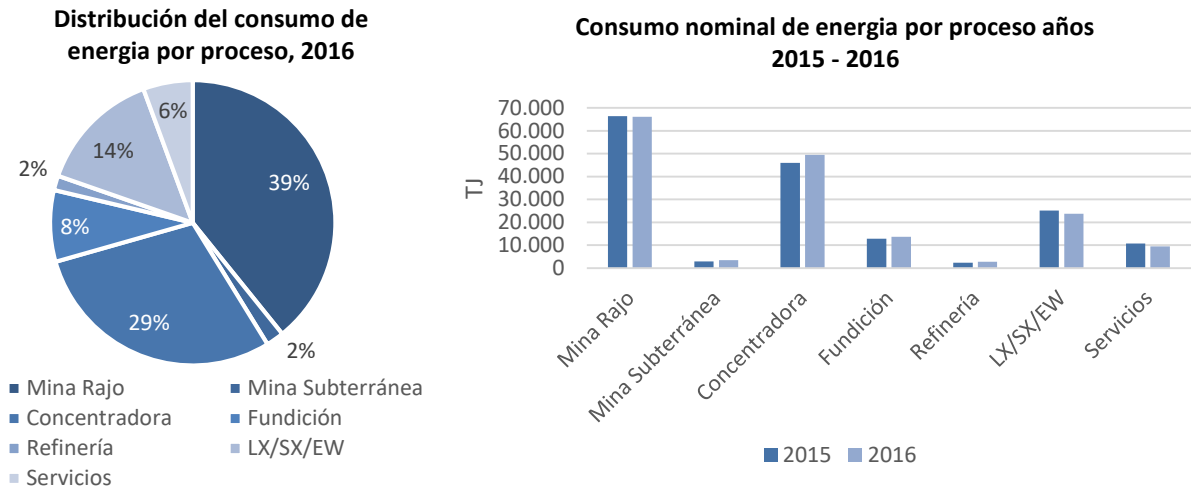
Fuente: Elaborado por Cochilco

El factor ley de mineral es sin duda un variable clave en la determinación de los requerimientos de energía, pues una importante parte de los aumentos de consumo son destinados a suplir menor productividad por bajas de ley sostenidas en el tiempo. La Figura 5 muestra la evolución del consumo unitario de energía agregada y separada por fuente, la ley de mineral y los índices de variación unitaria de los últimos 16 años, en ella, es posible apreciar el comportamiento contrapuesto de los índices (Figura derecha).

3.3. Consumo de Energía por Área de Producción

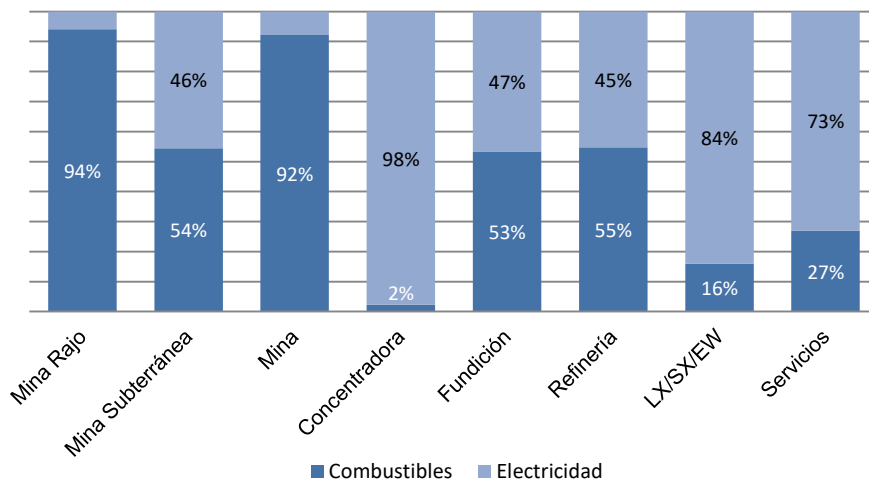
Al analizar el consumo total de energía de cada una de las áreas definidas del proceso de producción, Mina rajo, Mina subterránea, Concentración, Fundición, Refinería, Tratamiento de minerales lixiviables (LX/SX/EW) y Servicios, se observa en Figura 6, que en el año 2016 los procesos con mayor consumo de energía son: la mina rajo con 66.078 TJ, representando un 39% del total del consumo anual de energía, seguida por la concentradora con 49.526 TJ (29%) y el tratamiento de minerales lixiviables con 23.657 TJ (14%).



Figura 6 Consumo de total de Energía por Áreas de Producción en la minería del cobre 2001-2016

Fuente: Elaborado por Cochilco

En los tres procesos mencionados en el párrafo previo se marca un uso intensivo de un tipo de energía u otra. Mientras que en la mina rajo, el combustible representa el 94% de la energía utilizada, en la planta concentradora y el proceso de lixiviación se utiliza principalmente energía eléctrica, los cuales representan 98% y 84% respectivamente. La distribución de los consumos segregados por tipo de combustibles se presenta en la Figura 7.

Figura 7 Porcentaje de Consumo de Combustibles vs Energía Eléctrica por Áreas en el 2016

Fuente: Elaborado por Cochilco

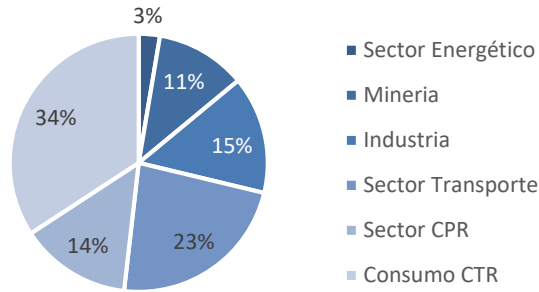
3.4. Participación del consumo de la energía de la minería del cobre en el consumo de energía a nivel nacional

La minería es uno de los principales consumidores de energía del país. Según datos del Ministerio de Energía, este sector consumió durante el año 2015 un 11% del total de energía consumida en el país, participación



considerablemente menor al sector transporte, industrial no minero y residencial, tal como lo expone la Figura 8¹. Se debe notar, que el Consumo energético CTR es aquel utilizado como insumo de nueva energía.

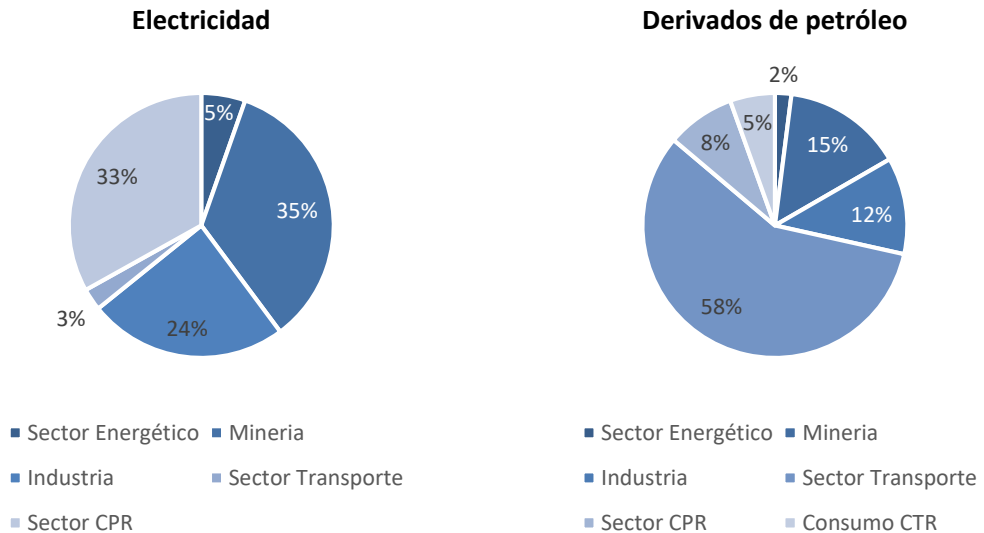
Figura 8 Participación del consumo sectorial de energía en el Consumo Nacional 2015



Fuente: Balance Nacional de Energía (BNE), 2016

En términos de energía eléctrica, se tiene que la minería² utiliza un 35% del consumo total de electricidad al año 2015, incrementando en 3,1 puntos porcentuales respecto del año anterior, consolidando con ello, la posición dominante de la industria minera.

Figura 9 Participación del consumo eléctrico y de derivados del petróleo sectorial de energía en el Consumo Nacional 2015



Fuente: Elaborado por Cochilco en base a datos del Ministerio de Energía

¹ CPR corresponde al sector Comercial, Público y Residencial, mientras que CTR hace referencia a los Centros de Transformación.

² El BNE entrega datos segregados para la minería del cobre, salitre, hierro y otras minas.

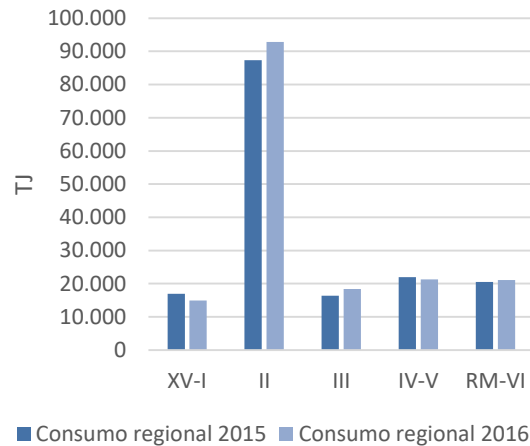


Sin embargo, lo descrito para el consumo eléctrico, no se repite para los derivados del petróleo. El BNE al año 2015 al año 2015³ en 15% el uso de estos por parte del sector minero, muy por detrás del sector transporte, que concentra el 58% del total nacional de derivados del petróleo. El panel de la derecha de la Figura 9 expone el estado del arte actual de la distribución del consumo de derivados del petróleo a nivel nacional.

3.5. Consumos de Energía por Región

En relación al consumo total de energía de la minería del cobre por región, en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver que en el año 2016, la Región con mayor consumo energético fue la de Antofagasta con 92.818 TJ, aumentando 6.3% respecto de 2015. Por contraparte, las regiones XV y I, redujeron su volumen de energía consumida en 11,7%, llegando a los 14.934 TJ. El mayor consumo energético de la región de Antofagasta esta dado principalmente por el mayor consumo de electricidad para impulsar y desalar agua de mar, cerca del 43% del mayor aumento de energía en esta región es por este motivo. Cabe señalar que el 88% de energía consumida en estos sistemas es requerido en la II región, y el 12% en la III región.

Figura 10 Consumo de energía por Región en la minería del cobre, 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

³ Al cierre del estudio no se contó con información del año 2016 del BNE.

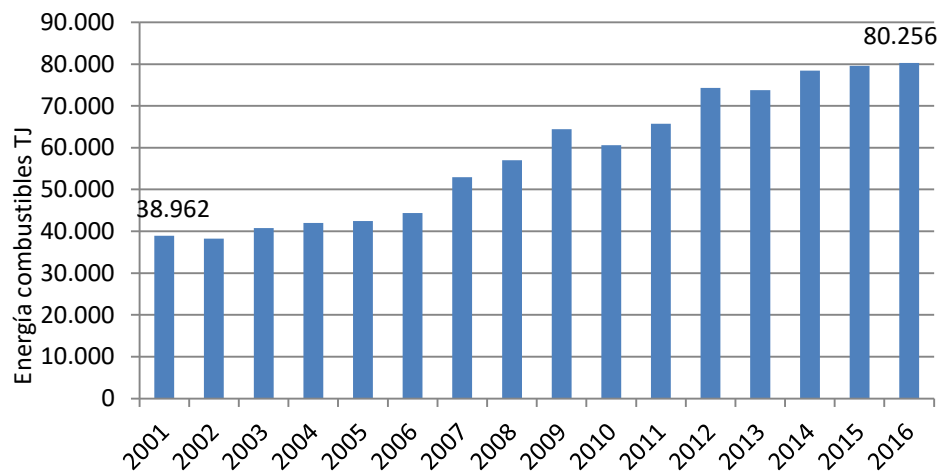
4. Consumo de combustibles de la minería del cobre

En esta sección se muestra información referente a la evolución interanual de energía en base a combustibles, el total de energía en combustibles por procesos y el consumo unitario de combustibles por cobre fino y por material procesado.

La Figura 11 presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el período 2001-2016. Durante el año 2016 se reportó un leve aumento en el consumo de esta fuente equivalente a 665 TJ, es decir, un aumento de 0.8% respecto a 2015.

Tal como se mencionó en el acápite anterior, ya desde el año 2013 se observa cierto grado de estabilización del consumo de combustibles, luego de un periodo de constantes alzas producto de sucesivos aumentos de producción. La duplicación del consumo de combustibles en el lapso de 16 años obedece a los mencionados cambios estructurales que enfrenta la minería del cobre. La evolución de las leyes de mineral y el envejecimiento de las minas explotadas, implican un mayor esfuerzo en materia energética para, al menos, sostener un volumen de producción.

Figura 11 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 - 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

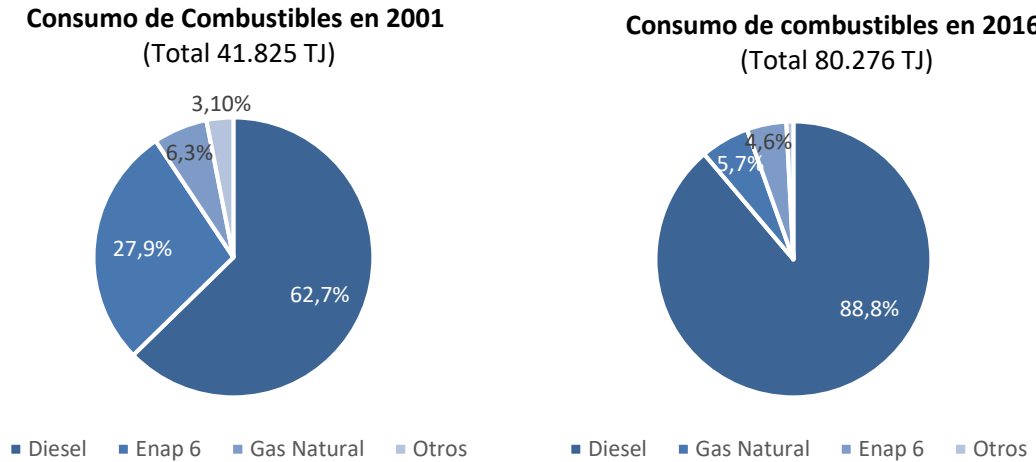
La Figura 12, presenta los cambios del mix de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (88,8%) ha ganado conforme evolucionan las operaciones mineras. A pesar de que en el agregado los combustibles solo se registra una alza de 645 TJ en 2016 respecto de 2015, en la minería del cobre se utilizaron 1194 TJ más de diésel que en 2015, evidenciando así la disminución nominal de todos los otros insumos catalogados como combustibles, siendo el gas natural y el enap 6 los con mayor disminución.

Precisamente es el gas natural el combustible que más ha ido disminuyendo su uso por parte de la minería del cobre, pues si bien en el año 2001 representaba un 27,9% de la cartera de combustibles consumidos, el año 2016 solo representó un 5,7% del total sectorial, presentando un alza de 560 TJ respecto de 2015. Situación similar, aunque bastante menos drástica, se repite con el consumo de enap 6. Este insumo, principalmente en los procesos de fundición y refinación, pasó de representar un 6,3% en 2001 a un 4,6% en 2016, 978 menos que lo reportado en 2015.



Lo anterior, es en gran medida consecuencia de la normativa ambiental en calidad del aire existente hace años en Chile, los cuales requerían para el cumplimiento de los límites de emisiones de material particulado y humos visibles en los hornos de refinación, el reemplazando del Enap 6 por gas natural, como también el reemplazo de quemadores convencionales por otros de alta eficiencia que consumen menos combustibles

Figura 12 Participación de Principales Combustibles en el Consumo Total de Combustibles en la Minería en los años 2001 y 2016



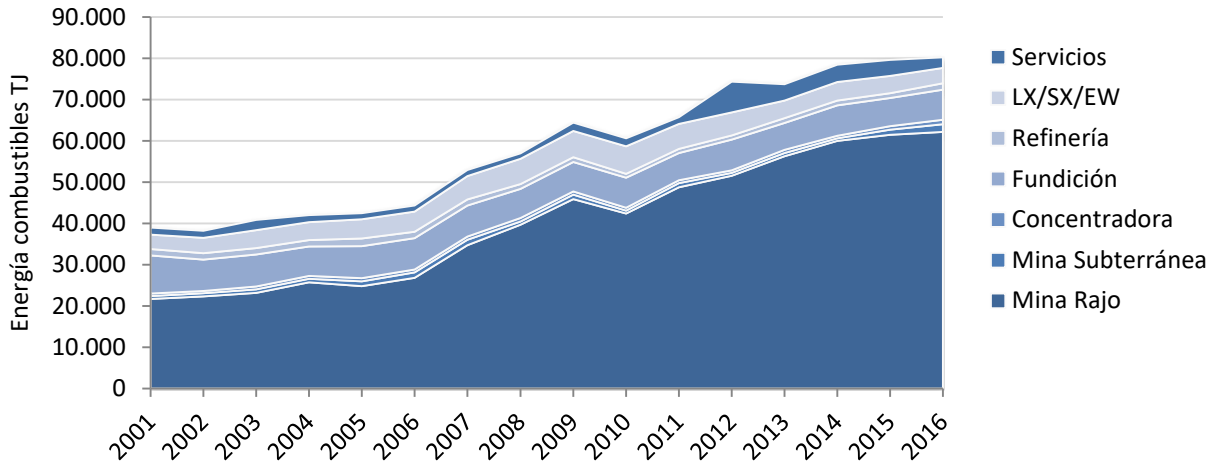
Fuente: Elaborado por Cochilco

En relación al consumo de combustibles por proceso minero, la figura siguiente expone la segregación acumulada por proceso de uso de combustible en TJ para el periodo 2001 – 2016. El proceso que mayormente utiliza combustibles sigue siendo la mina rajo con un consumo total al año 2016 de 62.180 TJ, lo que corresponde a un aumento de 1,2% respecto del año 2015. Si bien este aumento es esperable respecto de la antigüedad de las minas y su requerimiento energético para traslado de mineral, es considerablemente menor crecimiento anual histórico, el cual promedia un 7,6%.

En términos de distribución del consumo de combustibles por proceso, el 77,5% es utilizado en la mina rajo y son los cambios en este proceso los que inciden con mayor fuerza sobre el nivel agregado del uso de combustibles.



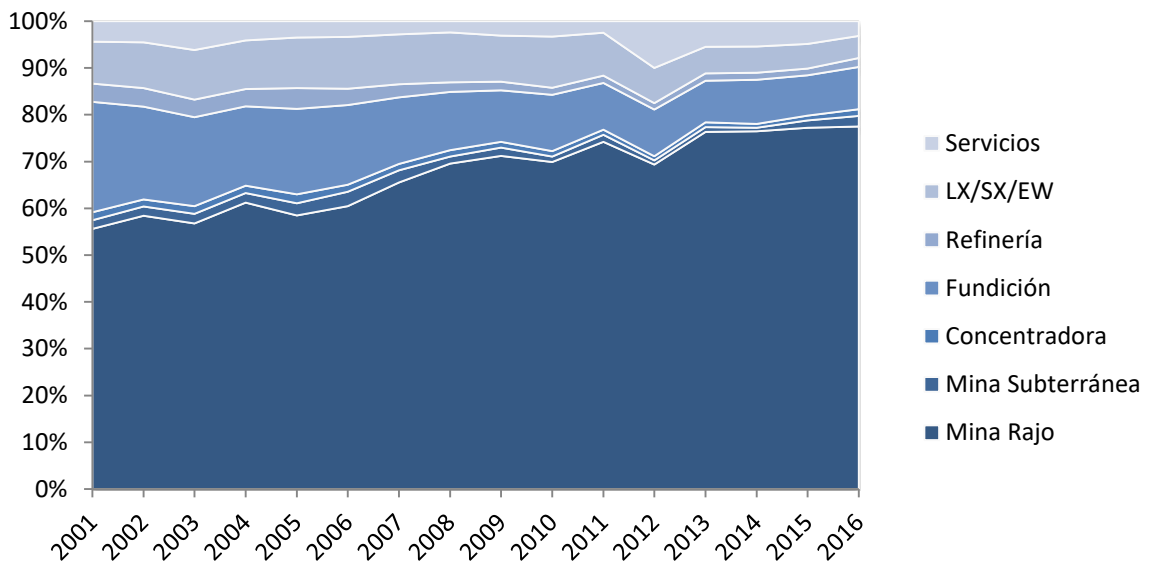
Figura 13 Consumo de combustibles por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

Por otro lado, el proceso que le sigue en importancia relativa en el consumo de combustibles, aunque a distancia, es el proceso de Fundición, que en el año 2016 tiene un consumo de 7.286 TJ. Es interesante hacer la observación que en el período 2001 -2016 este proceso ha mantenido constante el nivel nominal de combustible requeridos para su operación, promediando 7.375 TJ, y si bien el año 2001, el proceso requería del 23,6% del total de combustibles utilizados en la minería del cobre, el nulo aumento de capacidad de procesamiento incide directamente en el menor consumo relativo del energético, es así como al año 2016 solo representa un 9,1%.

Figura 14 Participación de los procesos mineros en el consumo total de energía en base a combustibles, 2001 – 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

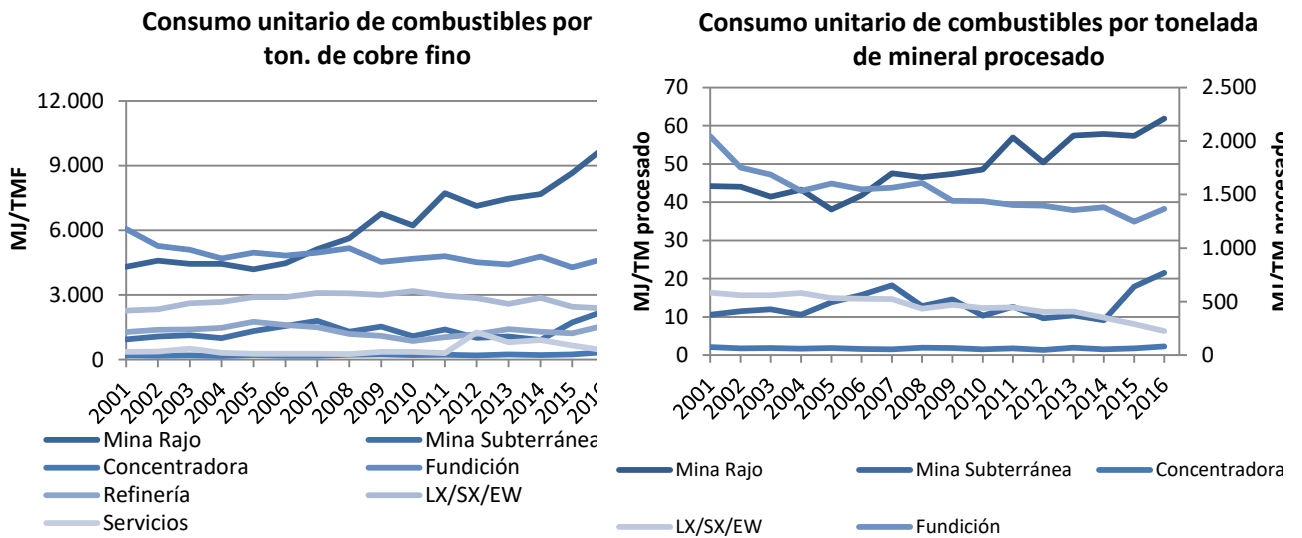
El tercer proceso que más consume combustibles es el de tratamiento de minerales lixiviables, que en el año 2016 registró un total de 3.760 TJ, lo que representa un 4,7% en el total de consumo de energía en base a combustibles. Tal como muestra la Figura 14, la participación relativa a otros procesos también sigue una



tendencia a la baja, hecho consecuente con la menor disponibilidad de minerales oxidados, lo cual se refleja en la cartera de productos comerciales.

A nivel unitario y con excepción del proceso de lixiviación, los combustibles por tonelada de cobre fino en todos los procesos reportaron importantes variaciones respecto del año 2015, cambios liderados por el proceso de concentración (+44,9%), y mina subterránea (+30,4%). Sin embargo, dado el menor uso combustibles en estas fases del proceso respecto de la mina rajo, causan un menor impacto agregado. Precisamente este último proceso sufre un aumento del 13,6% respecto del año anterior, además, registra significativos aumentos desde 2012, los cuales cobran más fuerza desde 2014, evidenciando aún más el impacto de las disminuciones en las leyes de mineral y del aumento de distancias de acarreo de mineral antes descrito.

Figura 15 Consumo unitario de combustibles por tonelada de cobre fino contenido y por tonelada de mineral procesado



Fuente: Elaborado por Cochilco

Cuando se analiza el consumo unitario de energía en base a combustibles por tonelada de mineral procesado, (panel derecho de la Figura 15), es decir, omitiendo el impacto de las bajas leyes, la mina rajo incrementa en un 7,9% el consumo interanual, entendiendo en esta magnitud las consecuencias de mayores distancias de acarreo y posibles ineficiencias de la operación, como las principales causas.



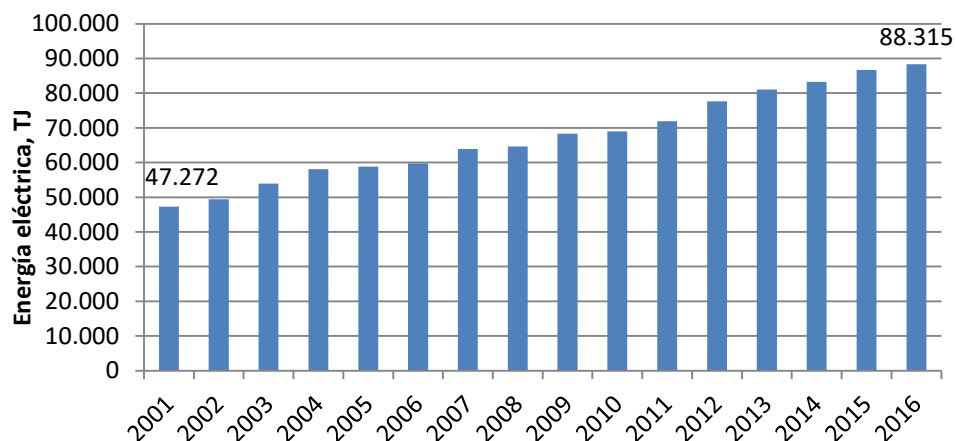
5. Consumo eléctrico de la minería del cobre

En esta sección se analizan el consumo y variación anual de la energía eléctrica en la minería del cobre a nivel global, por procesos, consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre y el consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral tratado según proceso. Luego se realizará un análisis comparativo en el consumo de electricidad en la producción de cobre entre los sistemas interconectados del norte grande y central.

5.1. Consumo eléctrico de la minería del cobre a nivel nacional

El año 2016 la minería del cobre consumió un total de 88.315 TJ en energía eléctrica. Este consumo corresponde a un incremento de 1,8% respecto de 2015, que alcanzó los 86.714 TJ. Comparando con el año 2001 se observa que el consumo de electricidad por parte de la minería del cobre aumentó un 86,8%, consecuencia de un ritmo de crecimiento del consumo de 4,3% anual. El aumento nominal del consumo eléctrico, expuesto en la Figura 16, viene dado principalmente por el aumento de capacidad de procesamiento de concentración a nivel nacional y del aumento del consumo eléctrico de los sistemas de impulsión y desalación de agua de mar a las faenas.

Figura 16 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001 - 2016



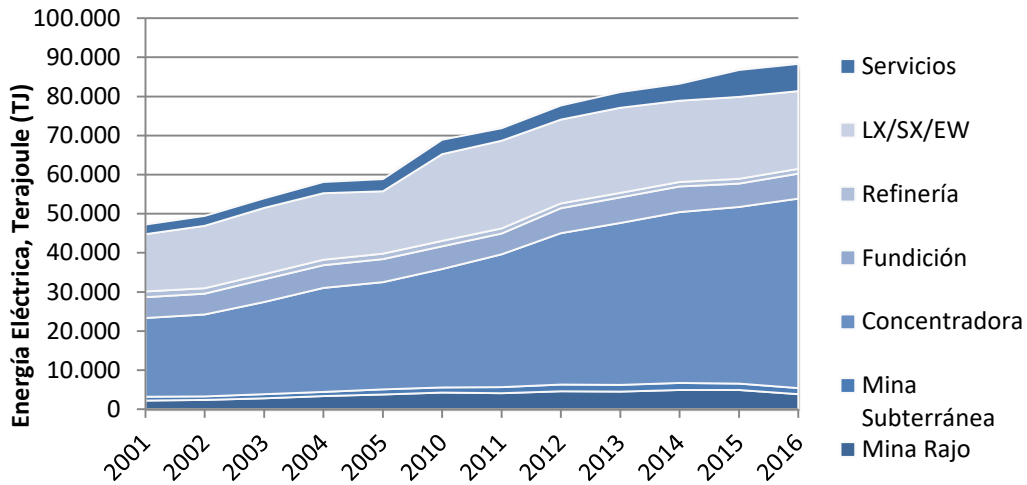
Fuente: Elaborado por Cochilco

En la Figura 17 se presenta el consumo eléctrico por proceso en la minería, apreciándose la consolidación de la mayor demanda eléctrica de plantas concentradoras en el año 2016, demandando 48.416 TJ, equivalente a un 54,8% del consumo total de energía eléctrica. El aumento del consumo eléctrico en este proceso se debe fundamentalmente con el incremento en el mineral procesado en las plantas concentradoras, el cual aumentó en un 12,9% respecto del año 2015.

El segundo proceso de mayor consumo eléctrico en 2016 corresponde a la lixiviación de mineral, la cual requirió de un total de 19.897 TJ, lo que corresponde a 22,5% del consumo total de energía eléctrica del año. En contraste con el año 2015, el consumo cae en 5%, consecuente con menor producción de cátodos EO de 118,100 TMF, ver Tabla 2.



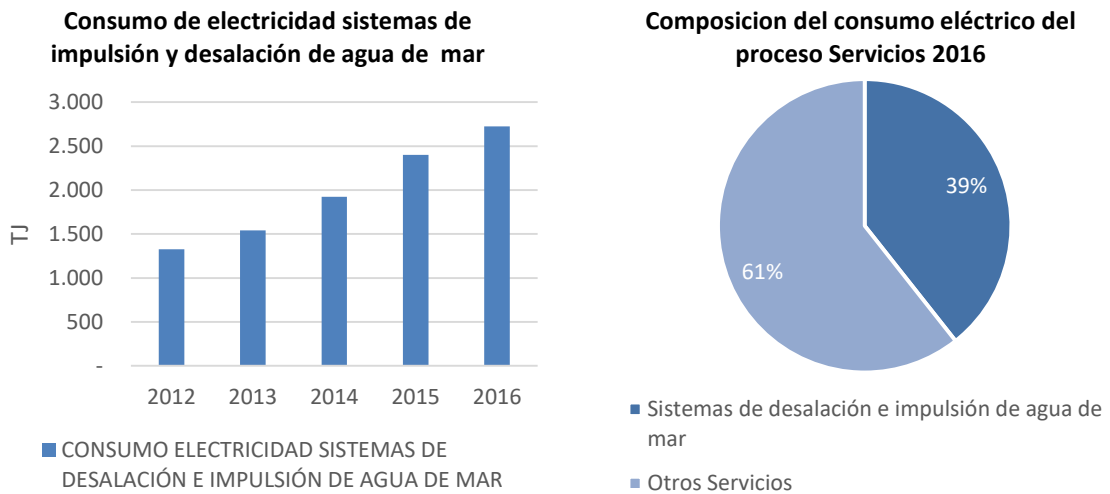
Figura 17 Consumo de electricidad por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

En la Figura 17, también representa el progresivo aumento del consumo eléctrico del sector servicios en los últimos años, que si bien hoy representa un 7,9% de total, sigue un ritmo de crecimiento superior a los otros procesos, debido principalmente a la inclusión en ese ítem del consumo eléctrico en sistemas de impulsión y desalación de agua de mar. La figura siguiente expone la evolución nominal del requerimiento eléctrico de ambos sistemas.

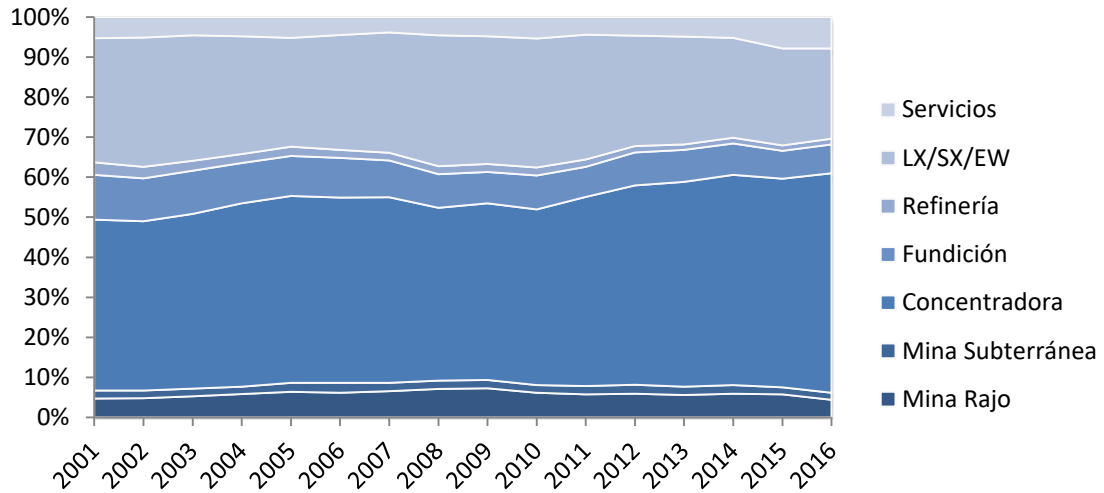
Figura 18 Consumo de energía eléctrica de sistemas de desalación e impulsión de agua de mar y composición del proceso servicios 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco

El crecimiento del consumo de energía eléctrica para transporte y desalación de agua en la minería del cobre crece a ritmo del 20% anual desde 2013, consolidando esta solución ante la escasez hídrica que afecta a gran parte del territorio minero nacional. El mayor peso relativo que este proceso ha obtenido en los últimos años, hace necesario un análisis más profundo por parte de la autoridad en materia de políticas públicas y planes de desarrollo de estos sistemas, pues se deben alinear e incluir elementos como el suministro eléctrico, la disposición de terrenos interiores para los ductos de impulsión y borde costero para las plantas de desalación.



Figura 19 Participación de los procesos mineros en el consumo total de electricidad, 2001 – 2016

Fuente: Elaborado por Cochilco

En la Figura 19 se muestra la evolución de la participación del consumo eléctrico por procesos. En él se aprecia el mayor requerimiento relativo de electricidad de las plantas concentradoras, que en el año 2016 aumentó en 7,2% el consumo respecto de 2015, continuando la tendencia alcista iniciada en 2010. Por otro lado, se observa que la participación relativa del proceso de LXSXEW en el consumo eléctrico ha disminuido en el tiempo, y en el año 2016 se confirma esta tendencia con un consumo 1000 TJ menor que en 2015, reducción fundada principalmente por la variación del set productos comerciales. Los cuales han cambiado según muestra la Tabla 2, y que van hacia una mayor producción de concentrados, es desmedro de la producción de cátodos.

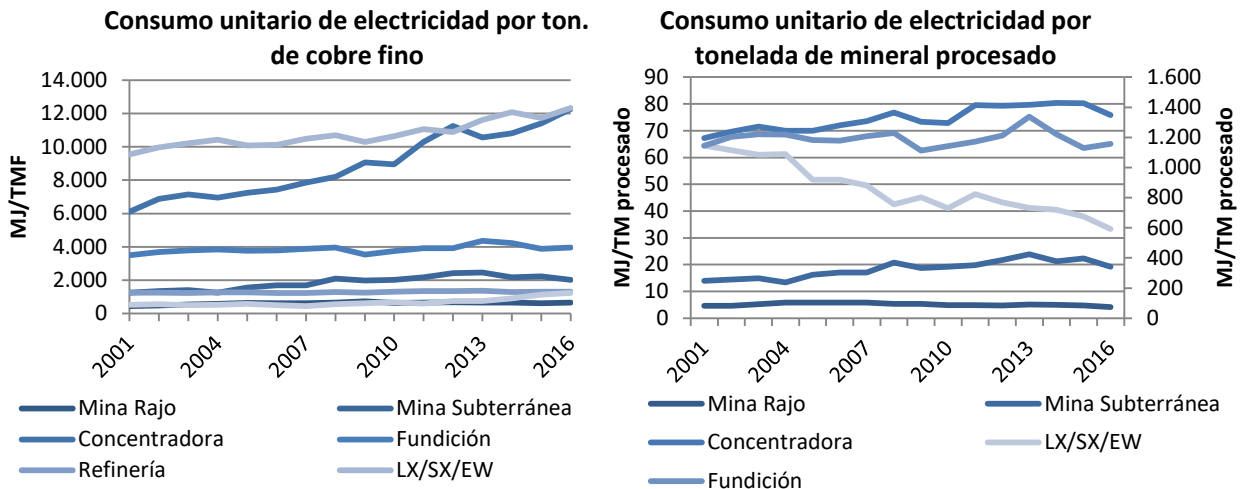
Tabla 2 Cartera de Productos Comerciales de Cobre en Chile

| | 2001 | 2014 | 2015 | 2016 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Concentrados | 1857 | 3032 | 3084 | 2940 |
| Cátodos ER | 1187 | 885 | 910 | 952 |
| Cátodos EO | 1538 | 1844 | 1778 | 1660 |
| Otros Refinados | 157 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL TMF | 4739 | 5761 | 5772 | 5553 |

Fuente: Elaborado por Cochilco

En relación a los consumos unitarios de electricidad por tonelada de mineral procesado y por tonelada de cobre fino, se presenta la Figura 20. En ella se destaca el sucesivo aumento del consumo unitario de energía eléctrica por tonelada de cobre fino producido (panel izquierdo) en el proceso de concentración, que en 2016 volvió a crecer un 7,6% respecto del 2015, acumulando un aumento del 100,9% en el periodo 2001 – 2016. En tanto en el consumo unitario del proceso de LXSXEW creció un 5,1% respecto de 2015.

Figura 20 Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido y por tonelada de mineral procesado



Fuente: Elaborado por Cochilco

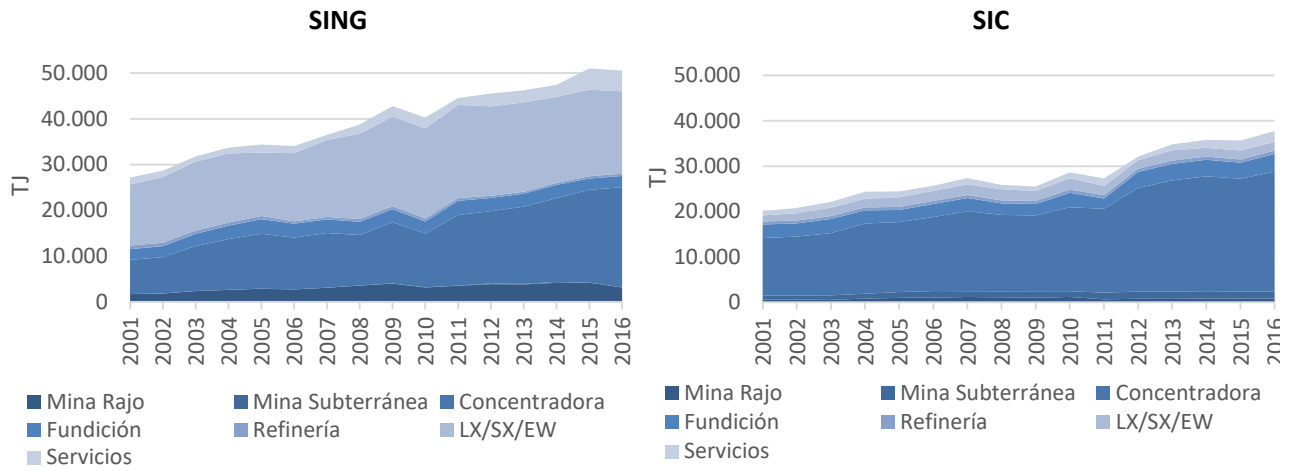
Por último, cuando se analiza el consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral procesado, la planta concentradora registra una disminución del 5,5% llegando a 75,8% TJ/TM procesado, valor más bajo desde 2010, al igual que el proceso de LXSXEW que reportó una nueva baja de 12,4%.

5.2. Consumo eléctrico de la minería del cobre en el sistema interconectado del norte grande y en el sistema interconectado central

El consumo de electricidad en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) fue de 50.577 TJ en 2016, registrando la primera baja nominal interanual de consumo desde 2010, equivalente al 0,9%. La situación contrasta con lo registrado para el consumo eléctrico provisto desde el Sistema Interconectado Central (SIC), el cual aumentó un 5,9% en comparación al 2015, alcanzando los 37.737 TJ.

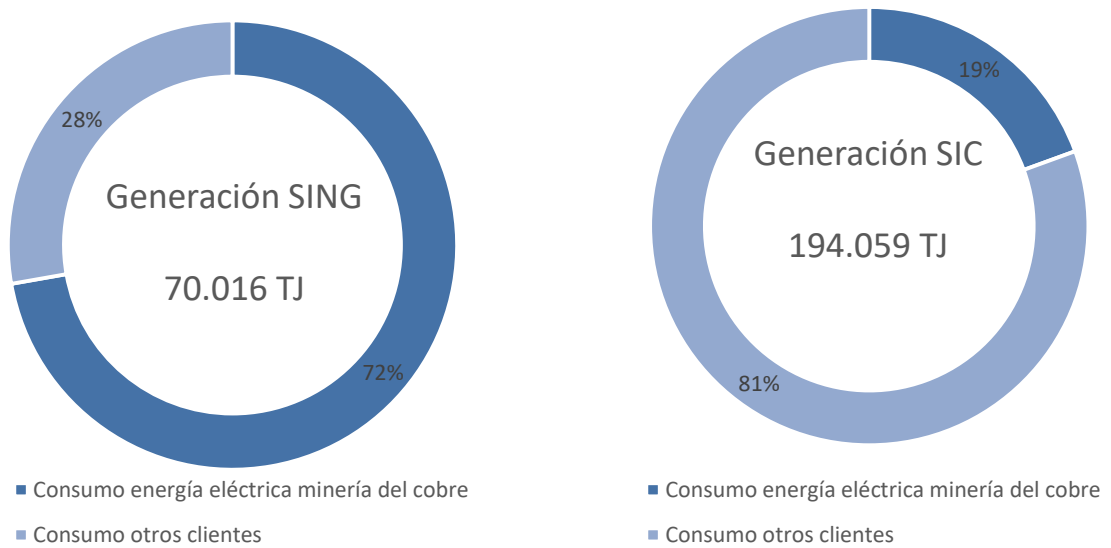
En el SING los procesos de mayor consumo eléctrico en el año 2015 corresponden al de Concentración con 21.936 TJ y al proceso de LXSXEW con un consumo de 18.009 TJ. Por un lado la Concentración en el año 2016 aumentó su consumo en un 8,0% respecto del año 2015 consecuente con el aumento del mineral tratado en las plantas ubicadas en la misma zona geográfica de un 4,3%, mientras que el proceso de LXSXEW disminuyó un 4,9% en el mismo periodo, relacionado con la menor producción de cátodos EO.

Figura 21 Evolución del consumo de electricidad por procesos en SIC y SING



Finalmente, mencionar el peso relativo de la industria del cobre en materia de consumo eléctrico por Sistema Interconectado. A nivel nacional, el SING generó 70.016 TJ en el año 2016, de los cuales el 72% fue consumido por la industria minera del cobre, 6 puntos porcentuales menos que lo registrado en 2015, en tanto el SIC generó 194.059 TJ de los cuales el 19% fue consumido por la minería del cobre.

Figura 22 Participación del consumo energía eléctrica minería del cobre en sistemas SING y SIC 2016



Fuente: Elaborado por Cochilco en base a información Anuarios CDEC SING - CDEC SIC, 2016



6. Comentarios finales

El envejecimiento de las minas y las restricciones hídricas en gran parte del territorio minero solo factores estructurales, que han impulsado un constante aumento de los requerimientos energéticos por parte de la minería del cobre durante los últimos años, no siendo el 2016 una excepción a esta tendencia. A su vez, la sucesiva mayor producción de concentrados de cobre, incrementa la necesidad de energía, sobre todo eléctrica, por dos vías. La directa, mediante el proceso mismo de concentración de mineral intensivo en energía eléctrica y agua. Precisamente por medio de las soluciones destinadas al suministro de este insumo crítico se da una demanda adicional indirecta al proceso principal, pues la desalación por osmosis inversa y la impulsión a través de geografías generalmente irregulares requieren de un alto consumo de energía eléctrica.

Hoy el escenario de suministro energético en el país se presenta más favorable para el desarrollo de la minería del cobre que años anteriores, en términos de que ha mantenido una tendencia a la baja en precios de combustible y energía eléctrica. Además, para 2018 está proyectada la integración total de los Sistemas Interconectados Central y del Norte Grande, avanzar hacia una mayor seguridad en el abastecimiento.

Lo anterior, entrega un escenario favorable para que la autoridad fortalezca las políticas asociadas al uso de agua de mar como solución ante la falta del recurso en gran parte del norte del país. Una rápida, pero profunda discusión en esta materia entregaría a la industria del cobre en Chile una herramienta robusta para dar salida a conflictos con comunidades que tienen su origen en el agua.

Por otro lado, es fundamental prestar atención al comportamiento de las leyes de mineral en distintas faenas, pues los niveles de consumo unitario de energía, sobre todo de combustibles, hacen evidente el deterioro de la competitividad de las operaciones mineras en Chile. La baja en un 5,8% de la ley promedio de mineral extraído de mina solo confirma la necesidad de mejorar continuamente la productividad del sector, vía eficiencia energética, ya sea por medio de mejoras de procesos o aplicación de nueva tecnología.

En esta materia es fundamental el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y el Estado con la eficiencia energética, ya que ello permite la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo la sustentabilidad del negocio minero.

En consecuencia, la visión de largo plazo que se le da al negocio minero va de la mano con el desarrollo que tiene el sector energético, el cual en el último tiempo ha presentado varios avances en materia de costos y seguridad del sistema que son sin duda un impulso para la industria. Sin embargo es necesario ir más allá para dar respuesta a los desafíos específicos que una minería madura le presenta al país.



7. Glosario

A continuación se presenta la terminología usada:

2.1 ENERGÍA: Es el tipo de energía utilizada en cada uno de los procesos identificados dentro de la producción minera. Se identifican dos fuentes principales: electricidad y combustibles. En este informe además, se identifica el concepto de energía como la suma de la energía utilizada en combustibles y la electricidad utilizada.

2.1.1 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. En el presente informe el consumo de combustible se entrega en unidades equivalentes de energía (Terajoules) considerando el proceso de generación y el rendimiento energético del mismo.

2.1.2 Electricidad: Considera la energía eléctrica consumida por la industria minera del cobre desde el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC).

2.2 PROCESOS: Se entienden por procesos como aquellas etapas productivas en la minería, claramente identificables, requeridas y separables de acuerdo a las tareas específicas para llevar a cabo la producción minera.

2.2.1 Mina Rajo: Se entiende como 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 procesos son: perforación y tronadura, transporte, carguío, chancado primario, entre otros. (Considera hasta el proceso unitario de Chancado Primario).

2.2.2 Mina Subterránea: Se entiende como el conjunto de procesos unitarios necesarios para la extracción de mineral desde una faena minera subterránea, utilizando cualquier método de explotación subterránea, para su posterior procesamiento y recuperación del mineral. Algunos de los principales procesos considerados son: perforación y tronadura, transporte, carguío, chancado primario, entre otros.

2.2.3 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, entre otros.

2.2.4 LXSXEW: Considera los procesos unitarios hidrometalúrgicos involucrados en la producción de cátodos electroobtenidos. Los principales procesos involucrados son: Aglomeración, Lixiviación ROM, Lixiviación HEAP, Extracción por Solventes y Electrobtención.

2.2.5 Fundición: Considera todos los procesos unitarios involucrados en la producción de cobre blister a partir de concentrados de cobre. Los principales procesos considerados son: Secado, Fusión (hornos), Conversión, Pirorefinación (refino y moldeo), entre otros.



2.2.6 Refinería: Corresponde al proceso físico de electrólisis con el cual se obtienen cátodos de cobre de alta pureza.

2.2.7 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.



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

Javier Hernández Meza

Analista de Estudios y Políticas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Julio / 2017

