



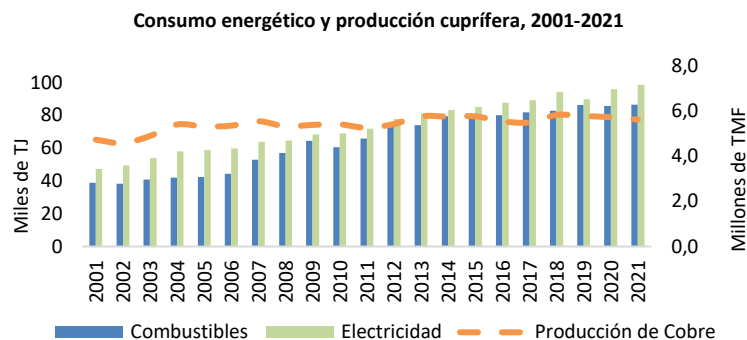
Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2021

DEPP 11/2022

Resumen Ejecutivo

El presente estudio se basa en los resultados de la Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE), aplicada anualmente por Cochilco a las operaciones mineras de cobre del país. Considerando un total de 51 operaciones mineras, entre las que se encuentran gran y mediana minería, fundiciones y refinerías, en el año 2021 llegó al 99,92% de la producción de cobre nacional, específicamente 99,98% de la producción de cátodos electroobtenidos y 99,9% de la producción de concentrados.

Lo anterior corresponde a un porcentaje alto de cobertura, sin embargo es crucial que siga el compromiso del sector minero del cobre y poner énfasis en la calidad de los datos entregados, para poder seguir con esta línea de trabajo que transparenta y acerca a la ciudadanía la realidad energética del sector y su real impacto e importancia energética en el país.



Fuente: Cochilco

Al 2021 la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 185.208 TJ, lo que representa alrededor del 15% del consumo agregado del país. De este total, 98.686 TJ son de la energía eléctrica y 86.522 TJ por consumo de combustibles. La Figura ilustra el consumo energético de electricidad (53% del total) y combustibles (47%) y la producción de cobre fino desde el 2001 al 2021.

Si bien a nivel general los consumos de electricidad y combustibles son relativamente similares, a nivel de procesos varían significativamente. Los tres más intensos en demanda energética son la mina rajo con 72.638 TJ que representa el 39% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 53.776 TJ (29%) y el proceso de Lixiviación con 23.221 TJ (13%). Para el caso del consumo de combustibles, la mina rajo se lleva el 79% del total de combustibles, seguido por fundiciones con un 7%. Para el consumo eléctrico en cambio, el proceso de concentradora es la fuerza dominante con un 53%, seguido de la electro-obtención con un 19%.

A nivel regional, Antofagasta es por lejos la región con mayor consumo energético tanto en combustibles (53,5 mil TJ, equivalente al 62 % del total de combustibles durante 2021) como en electricidad (54,3 mil TJ, equivalente al 55% del total eléctrico). La región de Atacama por su parte cuenta con una participación del 11% del consumo energético total, las regiones de Coquimbo y Valparaíso en conjunto con el 12%, las regiones de O'Higgins y Metropolitana con el 11% y la región de Arica y Parinacota con un 8%.

En relación al consumo por tamaño, la gran minería privada del cobre fue responsable de alrededor dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2021, mientras que la gran minería estatal, representada por Codelco, representa el 29% de combustibles y 27% de electricidad. La mediana minería privada por su parte es responsable del 3% de combustibles y 4% de electricidad respectivamente, en tanto la mediana minería estatal es responsable del 1% de combustibles y electricidad respectivamente.

Por último, en relación a los gastos por energía, vemos que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con USD 2.589 millones frente a los USD 1.177 millones del costo asociado al consumo de combustible durante 2021. Los resultados de este trabajo evidencian que la minería del cobre continua enfrentando requerimientos energéticos crecientes, por temas estructurales como el envejecimiento de las minas, el endurecimiento de la roca, la caída de las leyes de cobre, como por temas productivos y la tendencia hacia la producción de concentrados y la mayor necesidad de agua lo que implica la construcción de plantas desalinizadoras y la impulsión de agua de mar (desalinizada o directa).

Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo	I
1. Introducción	3
2. Metodología	3
2.1. Información general y encuesta	3
2.2. Análisis de los datos.....	5
2.2.1. Combustibles:	6
2.2.2. Energía Eléctrica:.....	7
3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional.....	8
3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre	8
3.2. Consumos por procesos productivos.....	9
3.3. Participación del consumo energético minero en el consumo nacional de energía.....	11
3.4. Consumos de Energía por Región	11
3.5. Consumos por tamaño de minería	12
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre	13
4. Consumo de combustibles	15
4.1 Consumo agregado.....	15
4.2 Consumo por procesos.....	16
4.3 Consumos unitarios	17
5. Consumo eléctrico.....	19
5.1. Consumo agregado	19
5.2. Consumo por procesos	19
5.3. Autogeneración de energía eléctrica.....	21
5.4. Consumos unitarios	22
6. Mercado eléctrico y sistema eléctrico nacional	25
7. Consumo energético minero sustentable	27
8. Gasto energético	28
9. Comentarios finales.....	32
10. Anexo: Operaciones consideradas	34



1. Introducción

Para el período que cubre el estudio, tanto los datos anuales de producción como los de uso de combustibles y electricidad la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) los ha obtenido de las respectivas faenas mineras de cobre del país a través de una encuesta segmentada y específica, hoy llamada Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE) que considera las áreas, etapas y procesos característicos para la producción de concentrados, cátodos, fundición y refinación. A través de este insumo, Cochilco calcula el consumo agregado e unitario de combustibles y energía eléctrica así como su evolución en el tiempo, desagregando además por tipo de procesos y zona geográfica, entre otros elementos. Esta información se publica en las *Estadísticas de consumo de energía del cobre*, disponibles en la página web <http://www.cochilco.cl/estadisticas/energia.asp>, y también se presenta a través del presente informe, cuyo objetivo consiste en analizar el consumo global de combustibles y electricidad incurridos por la minería del cobre, así como también revisar la evolución de sus consumos unitarios.

Para atender a estos objetivos, el informe en su sección 2 presenta la metodología usada, 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. En la sección 6 se presentan estimaciones de los costos energéticos incurridos y finalmente en la sección 7 se entregan comentarios finales del informe.

2. Metodología

La metodología se puede sintetizar en tres partes:

- a) A través de la EMPAE, se consultan los niveles de producción, consumo de energía y agua por proceso minero.
- b) Se revisa la información recibida y se solicitan ajustes a las empresas en caso de existir discrepancias con otras fuentes de información o valores atípicos respecto de la información histórica.
- c) En base a la información suministrada por las operaciones mineras se calculan los consumos globales y unitarios de energía de electricidad y combustibles por procesos a nivel nacional. Los consumos totales se presentan en terajoules (TJ) y los consumos unitarios en megajoules por tonelada métrica (MJ/TM).

2.1. Información general y encuesta

Se identifican dos líneas de producción de cobre de acuerdo al mineral procesado. Primero, el procesamiento de minerales sulfurados, los cuales siguen una línea de producción de flotación y concentración. Por otro lado, los minerales oxidados, y sulfuros de baja ley, que 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 refinería. 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. En la Figura 1, se muestran en cada una de las casillas el producto, y sus respectivas unidades, de cada uno de los procesos.

Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre

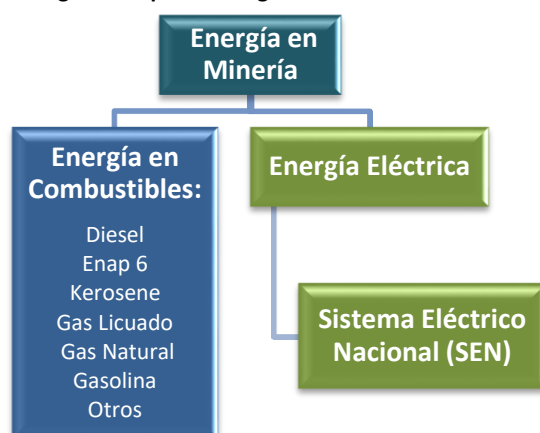


* Pregnant Leach Solution (PLS)

Fuente: Cochilco

Aunque no se ilustra 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, tales como el consumo asociado a campamentos y talleres e impulsión y desalación de agua, entre otros. Las principales fuentes de abastecimiento energético de la minería son los combustibles y la electricidad. Cabe señalar, que el suministro de electricidad proviene ya del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), sistema que desde el 2017 comenzó a forjarse y es la unión de los dos principales sistemas que tenía el país, el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). 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, Butano y Escaid 110.

Figura 2: Tipo de energía utilizada en minería del cobre



Fuente: Cochilco

La información para determinar los consumos de energía se efectúan a través de EMPAE, encuesta que recoge información de producción de los principales procesos productivos, identificando los insumos minerales, así como también sus productos y sus principales características. Por ejemplo, en el caso de extracción mina, se reportan las cantidades 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 diésel) y el agua total consumida y reciclada por procesos.

El año 2021 respondieron la encuesta un total de 51 operaciones mineras, entre las que se encuentran minas, fundiciones y refinерías, las que representan 99% de la producción de cobre nacional de 2021, específicamente 95% de la producción de cátodos electro obtenidos y 99% de la producción de concentrados (véase el anexo para el listado completo de las operaciones). Lo anterior corresponde a un porcentaje alto de cobertura alcanzado desde la creación de la EMPAE, sin embargo es crucial que siga el compromiso del sector minero del cobre y poner énfasis en la calidad de los datos entregados, para poder seguir con esta línea de trabajo que transparenta y acerca a la ciudadanía la realidad energética del sector y su real impacto e importancia energética en el país.

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 considerando el estado del arte de la tecnología dentro de la industria minera y factor energético de los combustibles. Las conversiones se ilustran en la Tabla 1.

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

Combustible	Unidad	Cantidad	Energía Útil en 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
Nafta	M3	1	34
Propano	M3	1	26
Escaid 110	t	1	36.028

Fuente: Cochilco

A continuación se presentan los principales indicadores usados 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 al total 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 la 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).

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

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

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.

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

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

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

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

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

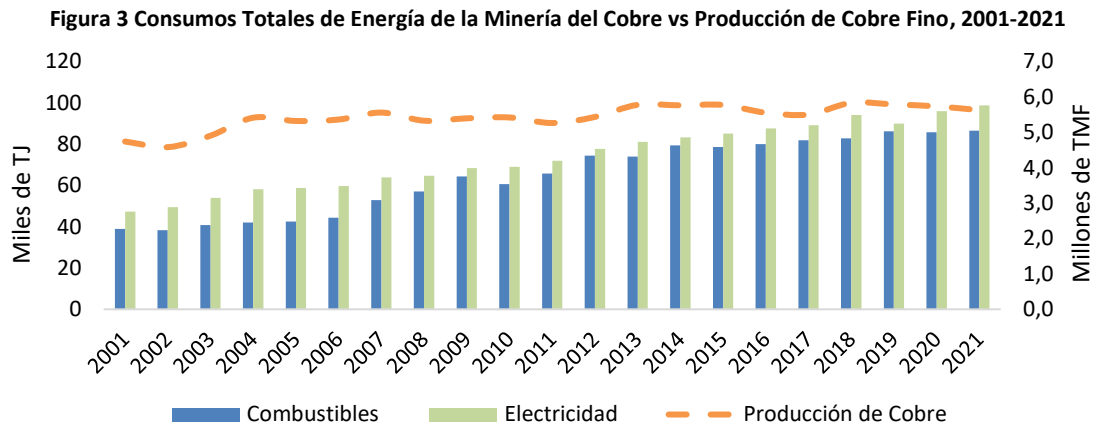


3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional

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

3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre

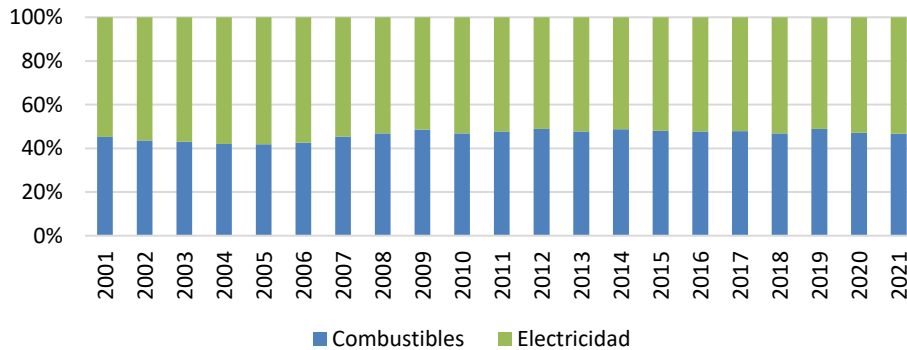
Si bien la producción de cobre y el consumo energético son variables históricamente correlacionadas positivamente, en los últimos años se hace visible el desacople entre las mismas. Entre el 2001-2021 la producción nacional de cobre mina se presenta más bien estable, creciendo a una tasa promedio anual del 0,9%, llegando en el año 2021 a 5,63 millones de TM, lo que representa un aumento del 18,7% en el período analizado. En tanto el consumo energético de la minería, ha aumentado un 114,8% a una tasa promedio anual del 3,96%, llegando así a 185.208 TJ en el 2021 (Ver Figura 3). Comparando con el 2020, el consumo energético aumentó un 1,9 %, a su vez, la producción nacional de cobre mina disminuyó en 1,9%.



Fuente: Cochilco

Al desglosar por tipo de energía entre el 2001-2021, como se muestra en Figura 4, el consumo de combustible aumenta en un 122,1%, en tanto el consumo de la electricidad aumenta en un 108,8% en el período.

Figura 4 Participación según tipo de energía en el consumo total de energía de la minería del cobre, 2001-2021



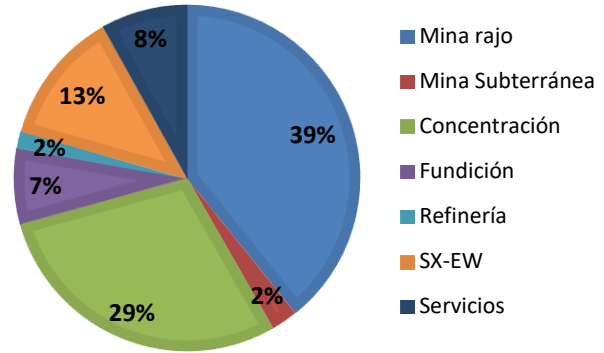
Fuente: Cochilco

La participación promedio en el período analizado para combustibles es del 46,4 % y 53,6 % en electricidad, en tanto para el año 2021 el consumo de combustibles logra una participación del 46,7% y la electricidad un 53,3 %.

3.2. Consumos por procesos productivos

Figura 5 Participación en consumo de energía por proceso, 2021

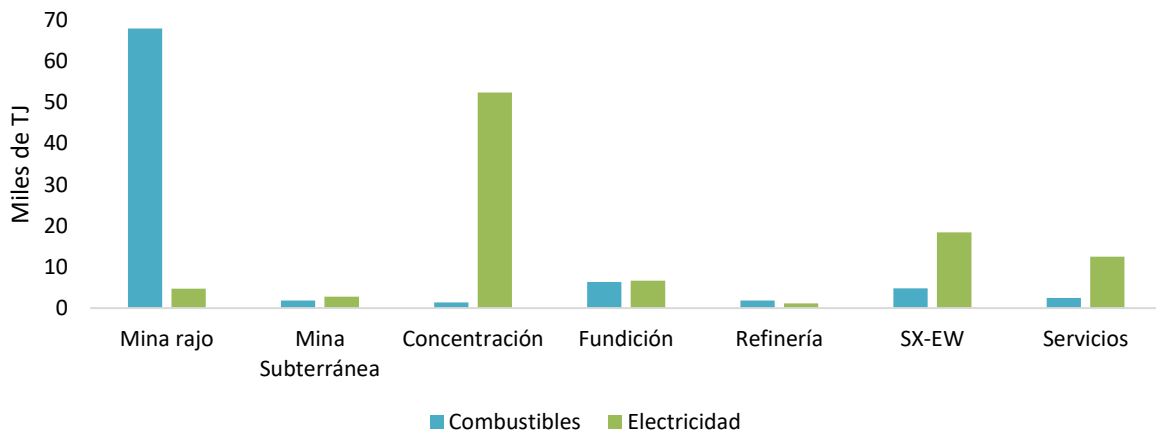
A nivel de consumo energético por procesos, los tres más intensos son la mina rajo con 72.638 TJ que representa el 39,2% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 53.776 TJ (29,0%) y el proceso de Lixiviación con 23.221TJ (12,5%).



Fuente: Cochilco

Desglosando por tipo de energía utilizada en cada proceso, el consumo de combustibles en la mina rajo se lleva el 78,5% del total de combustibles usados en minería, en cambio en el proceso de concentración y lixiviación la fuerza dominante es el consumo eléctrico el cual representa un 53,1% y 18,7% respectivamente del consumo total eléctrico minero en el 2021. La Figura 6 a continuación resume los consumos por proceso y tipo de energía para el año 2021.

Figura 6 Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre, 2021



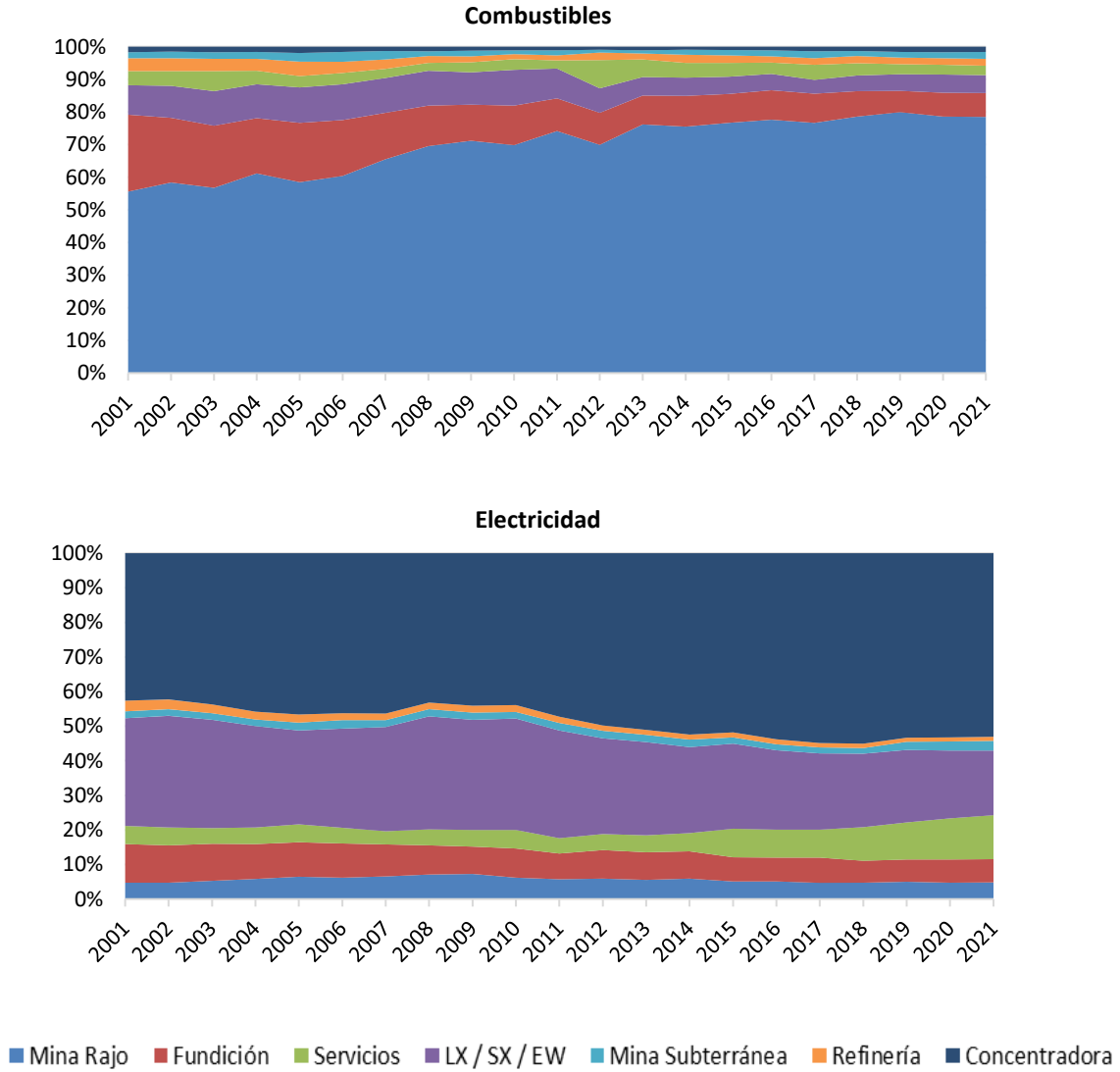
Fuente: Cochilco

Analizando la evolución entre el 2001 al 2021, visible en Figura 7 que ilustra la participación en el tiempo de los consumos de combustibles y electricidad por proceso, se advierte que ambos procesos dominantes en consumo, mina rajo en combustibles y concentradora en electricidad, se han vuelto progresivamente más intensivos en su uso, aún en relación a los otros procesos. Así, la



participación del consumo de combustibles de mina rajo se incrementó desde un 55,6% del consumo agregado de combustibles en 2001 al 78,5% en 2021. Por el lado de la electricidad, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando del 42,6% del total en 2001 al 53,1% en 2021.

Figura 7 Evolución en la participación (%) por proceso en el consumo de combustibles y electricidad, 2001-2021



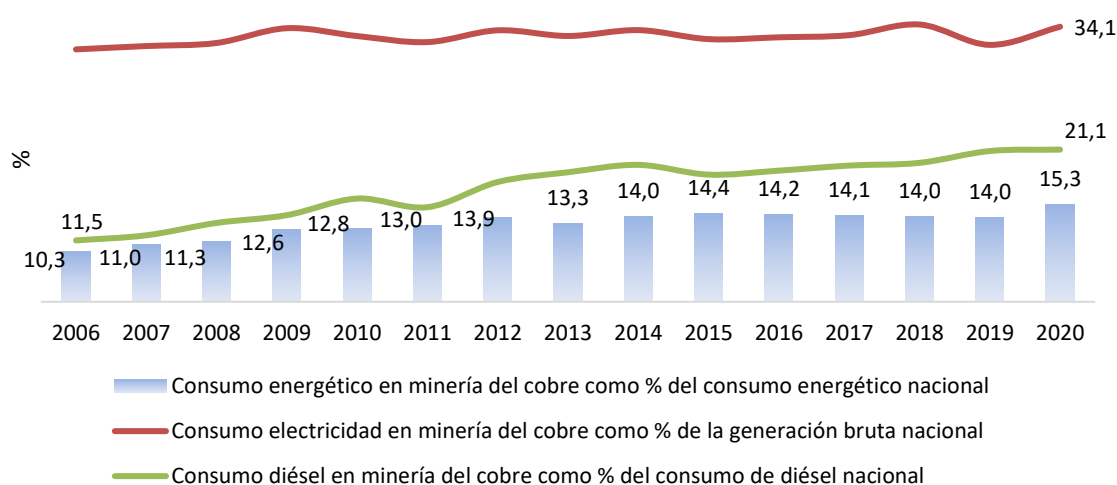
Fuente: Cochilco



3.3. Participación del consumo energético minero en el consumo nacional de energía

La minería es uno de los principales consumidores de energía del país. En efecto, de acuerdo a los datos nacionales de consumo energético provistos por la Comisión Nacional de Energía, Cochilco estima que el sector minero en el 2020 es responsable del 15,3% del consumo energético del país, cifra que en general ha experimentado progresivas alzas marginales desde el 2006 en adelante (Ver Figura 8).

Figura 8 Participación del consumo sectorial de energía en el consumo nacional, 2006-2020



Fuente: Cochilco en base a datos propios y el Anuario Estadístico de Energía 2021 (Comisión Nacional de Energía, 2021)

Desagregando los datos, vemos que en el mismo periodo el consumo de electricidad se ha mantenido relativamente estable llegando a un 34,1% del total nacional en el 2020, mientras que el consumo de diésel, el principal combustible minero, ha ido aumentando su participación de un 11,5% en 2006 a un 21,1% del consumo nacional en el año 2020.

3.4. Consumos de Energía por Región

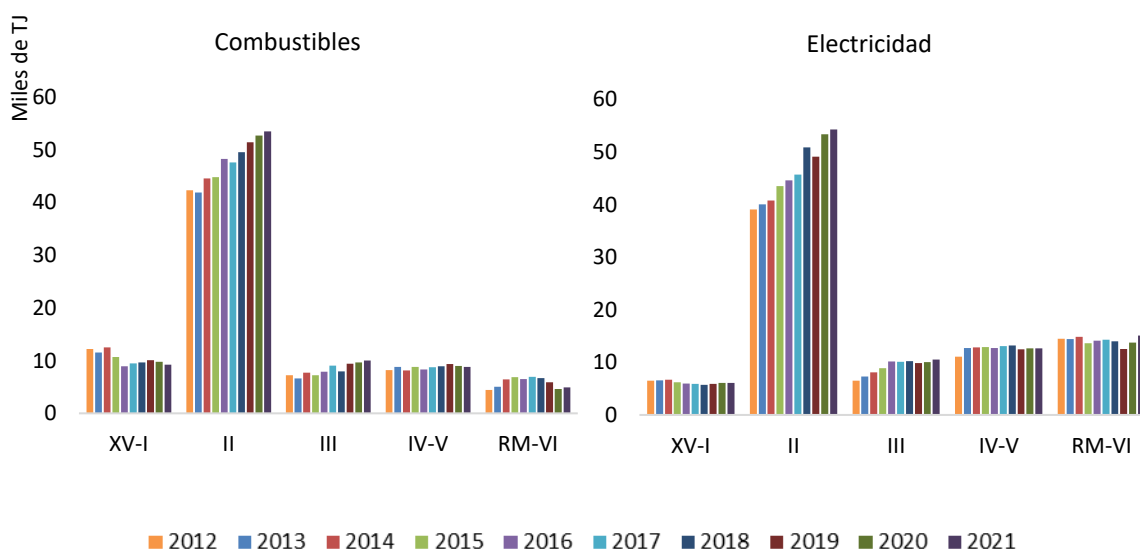
Como se aprecia en la Tabla 2, Antofagasta (II) es por lejos la región con mayor consumo energético tanto en combustibles (53 mil TJ, equivalente al 61,8% del total de combustibles durante 2021) como en electricidad (54 mil TJ, equivalente al 55,0% del total de electricidad). El mayor consumo energético de Antofagasta viene dado por su alta producción de cobre (52,3% del total) pero también –como se señaló previamente– por las restricciones geográficas que enfrenta, en particular las restricciones de agua continental en el norte del país ha incentivado a muchas operaciones a ocupar agua de mar cuyo proceso de impulsión y desalación es altamente intensivo en energía eléctrica. Conjuntamente en 2021 ha habido un aumento en consumo de agua de mar en la Región respecto al 2020 con plantas operando a su total capacidad como la Planta Desaladora Coloso.

Tabla 2: Participación (%) del consumo de energía y producción de cobre por región, 2021

	XV-I	II	III	IV-V	RM-VI
Consumo electricidad	6,2	55,0	10,7	12,8	15,3
Consumo combustibles	10,7	61,8	11,6	10,2	5,7
Consumo total energía	8,3	58,2	11,1	11,6	10,8
Producción cobre	12,4	52,3	7,2	13,3	14,8

Fuente: Cochilco

En este contexto, el consumo energético total de Antofagasta ha estado en alza durante los últimos años, pasando de 81,4 mil TJ en 2012 a 107,8 mil TJ en 2021 (+32,4%). Atacama (III) también ha experimentado un alza en el mismo periodo, pasando de 13,7 mil TJ a 20,6 mil (+50,0%). Por otra parte, las regiones de Coquimbo y Valparaíso (IV y V) tuvieron un alza de 19,3 mil TJ a 21,5 mil TJ (+11,4%), mientras que las regiones Metropolitana y del Libertador Bernardo O'Higgins (RM y VI) se ha mantenido subiendo levemente de 18,9 mil TJ a 20,0 mil TJ (5,7%) en el mismo periodo. Al mismo tiempo, las regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota (I y XV) decrecieron, bajando de 18,7 mil TJ a 15,3 mil TJ (-18,2%).

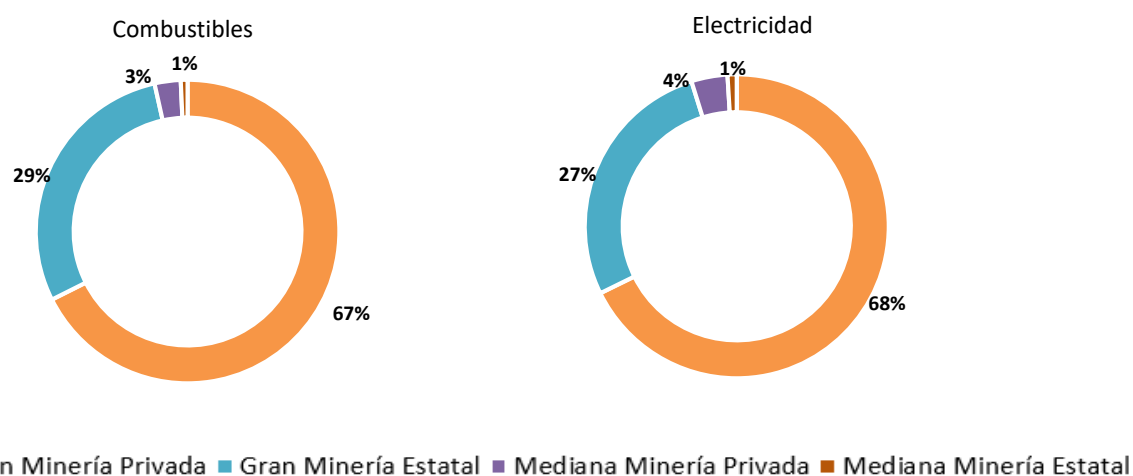
Figura 9 Consumo de energía en la minería del cobre por región, 2012-2021

Fuente: Cochilco

3.5. Consumos por tamaño de minería

Como se aprecia en la Figura 10, la gran minería privada del cobre fue responsable de alrededor de dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2021. La gran minería estatal por su parte, representada por Codelco, concentró el 29,0% de combustibles y el 26,9% de electricidad, respectivamente. La mediana minería privada es responsable del 2,7% de combustibles y 4,2% de electricidad. Por último, la mediana minería estatal, representada por las plantas de Enami, consume cerca del 1% en cada fuente energética.

Figura 10 Consumo de energía en la minería del cobre por tamaño, 2021



Fuente: Cochilco

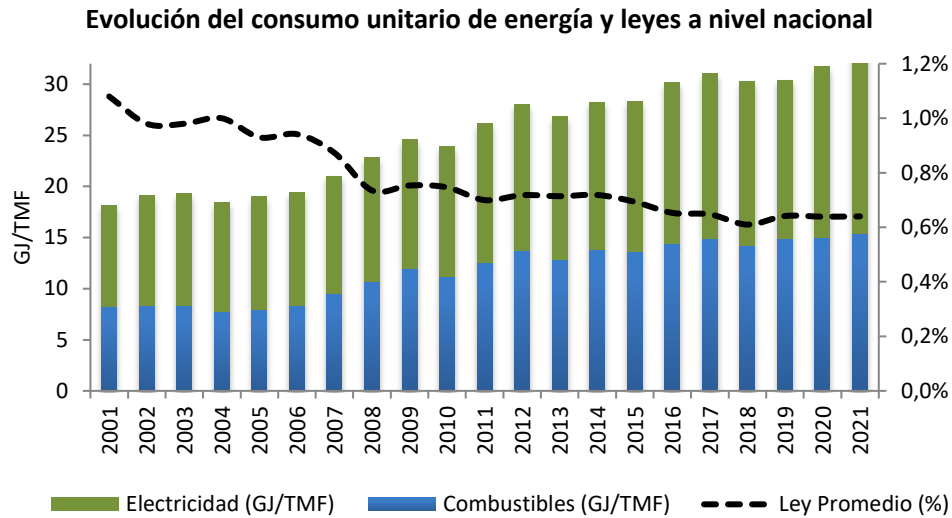
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre

El consumo unitario de energía es una medida útil para cuantificar la energía consumida para producir una unidad de producto (1 tonelada de cobre fino contenido) y permite analizar así la tendencia del consumo de energía en la producción minera. Es así como, para el año 2021 se necesitaron en promedio 32,9 GJ para producir una tonelada de cobre fino, un 80,9% más de lo que se necesitaba en 2001.

El consumo de combustibles es el mayor responsable de este incremento, pasando de 8,2 GJ/TMF en 2001 a 15,4 GJ/TMF en 2021 (+87,1%), mientras que el consumo de electricidad aumentó de 10,0 GJ/TMF a 17,5 GJ/TMF (+75,9%) durante el mismo periodo. El consumo de combustibles para producir una tonelada de cobre fino ha tenido un mayor crecimiento principalmente a causa del consumo de combustibles en el transporte de mineral desde la mina rajo en minas de mayor antigüedad y profundidad y con cada vez mayores distancias de acarreo. El aumento sostenido del consumo eléctrico por su parte ha estado fundamentalmente determinado por cambios en la cartera de productos comerciales (de cátodos a concentrados) y cambios tecnológicos (como uso de agua de mar), que están indicando que el sector minería del cobre, en la segunda parte de esta década, está experimentando un aumento en la intensidad de uso de electricidad.

Al mismo tiempo, las leyes de mineral son indudablemente una variable crucial en la determinación de los requerimientos de energía dado que una importante parte de los aumentos de consumo son destinados a suplir menor productividad por bajas de ley sostenidas en el tiempo. La Figura 11 ilustra la relación inversa entre la evolución del consumo unitario de energía y la ley promedio anual del mineral desde el 2001 al 2021.

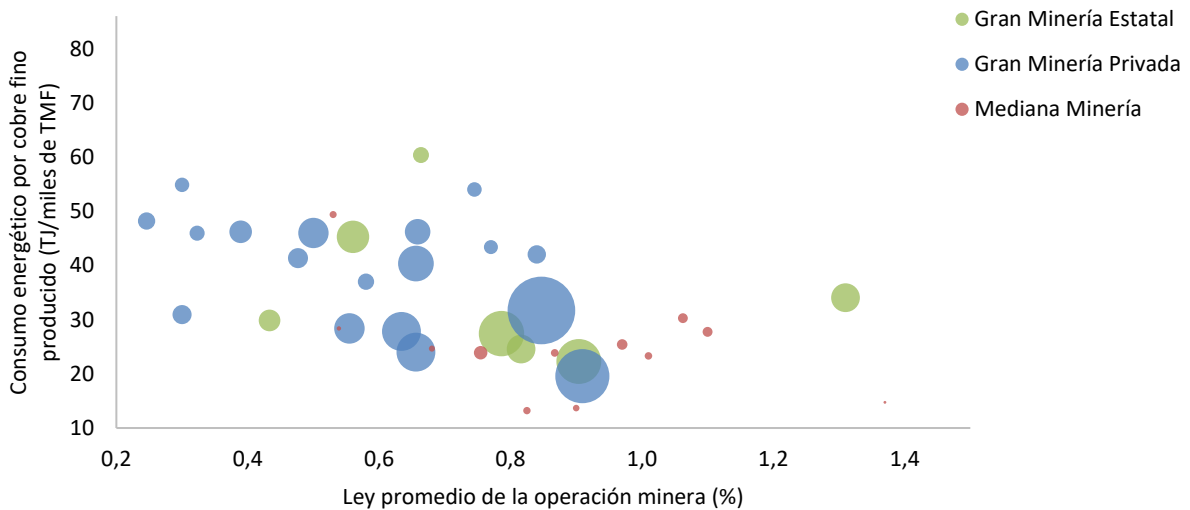
Figura 11 Evolución del consumo unitario de energía y leyes a nivel nacional, 2001-2021



Fuente: Cochilco

Otra forma de describir esta relación inversa es a través de los coeficientes de consumo energético por cobre fino producido versus las leyes promedio por operación minera al año 2021, como se ilustra en la Figura 12. Como se puede apreciar, las operaciones mineras con mejores leyes de explotación de mineral en general tienen menores niveles de consumo energético por producción de cobre, lo que respalda la incidencia de la ley del mineral en los requerimientos de energía.

Figura 12 Consumo energético por cobre fino producido versus ley promedio del mineral por operación minera, 2021



Nota: Los tamaños de las circunferencias se grafican según el nivel de producción de cobre fino equivalente durante 2021

Fuente: Cochilco



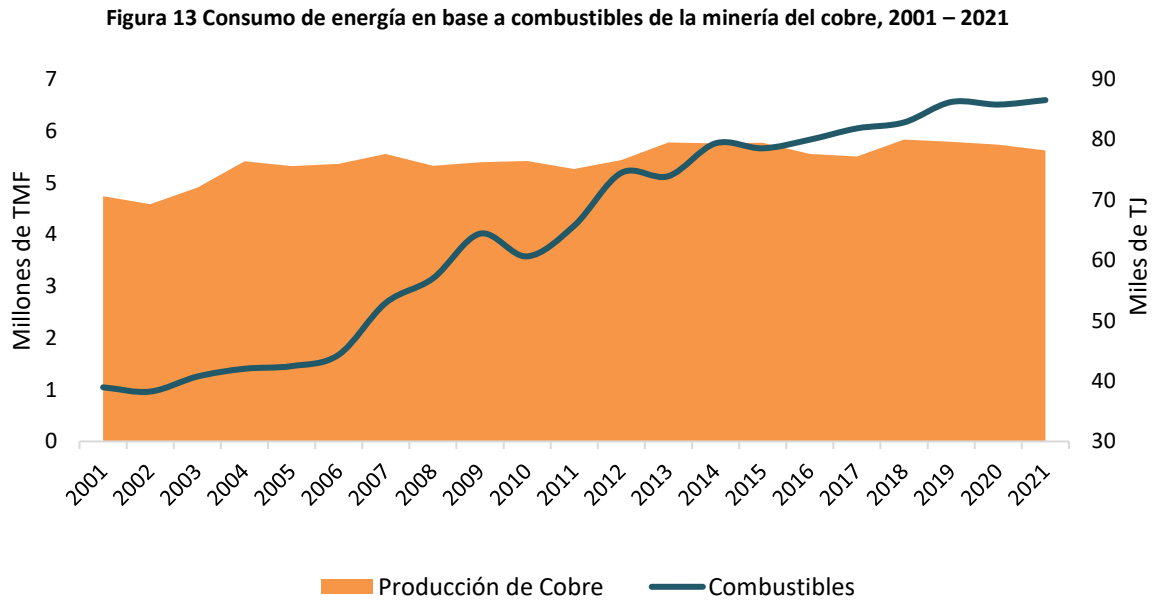
4. Consumo de combustibles

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.

4.1 Consumo agregado

La Figura 13 presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el período 2001-2021. Durante el año 2021 alcanzó los 86.522 TJ, registrando así un leve aumento del 0,9% respecto al 2020, y comparado con el 2001 se registró un aumento del 122,1%.

Este crecimiento sostenido en el consumo de combustibles obedece a una producción que en general tiende al alza junto a cambios estructurales que enfrenta la minería del cobre en particular en la fase de explotación, en mina rajo.



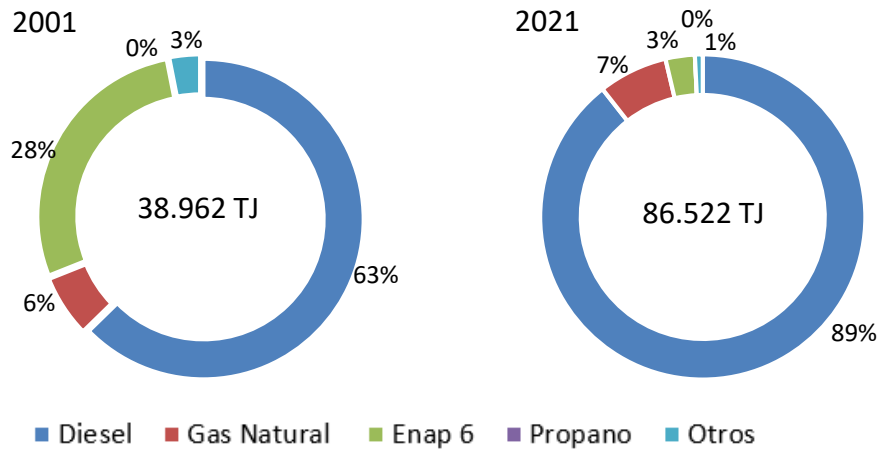
Fuente: Cochilco

La Figura 14, presenta los cambios de la matriz de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (89% del total durante 2021 versus un 63% en 2001) ha ganado conforme evolucionan las operaciones mineras. Cabe señalar que también se ha visto un incremento en consumo diésel debido al consumo en transporte para disposición de relaves y algunas mineras están en ejecutando la construcción de muros de relaves.

En paralelo, otros combustibles han ido perdiendo progresivamente su usabilidad, destacando el caso del Enap 6. Dicho combustible en el año 2001 representaba un 27,9% de la cartera de combustibles consumidos, pero para el año 2021 solo representó un 3% del total sectorial. Lo anterior se debe en gran medida a la normativa ambiental en calidad del aire existente a nivel nacional, la cual impone límites de emisiones de material particulado y humos visibles en los hornos

de refinado, lo que ha conducido a reemplazar Enap 6 por gas natural, como también la sustitución de quemadores convencionales por otros de alta eficiencia que consumen menos combustibles.

Figura 14 Participación de combustibles en el consumo total de combustibles, 2001 y 2021

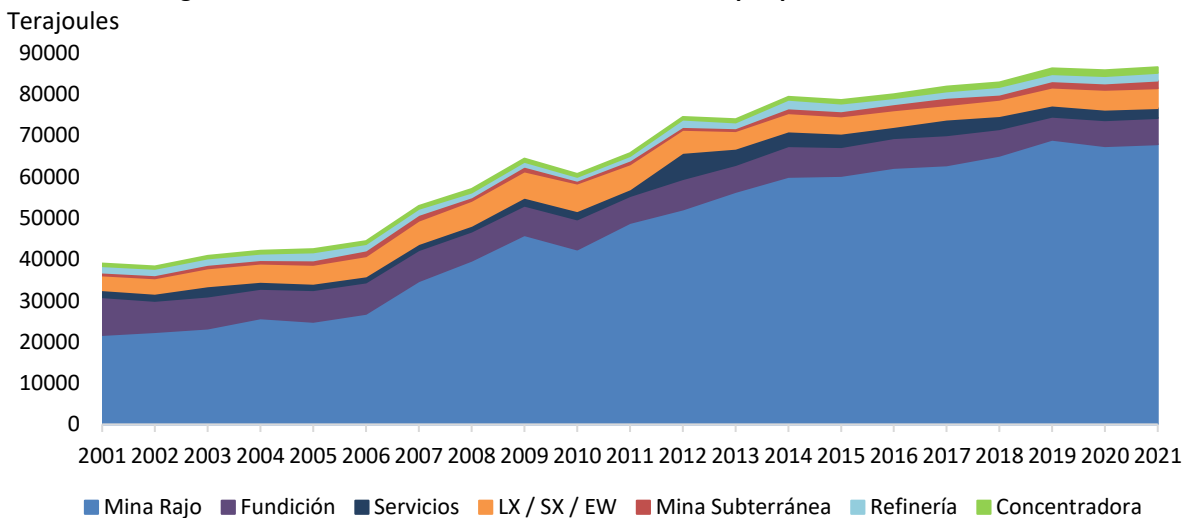


Fuente: Cochilco

4.2 Consumo por procesos

Como se observa en Figura 15, el proceso que mayor combustible demanda es la mina rajo (78,5% del total de combustibles usados en minería) y al ver su evolución desde el 2001, el consumo de combustible se ha triplicado prácticamente de 21.664 TJ en 2001 a 67.896 TJ en 2021. Esto se explica por una lado por el incremento del 18,7 % de la producción de cobre entre 2001-2021 lo que conlleva un mayor procesamiento de mineral y por otro lado debido a temas estructurales que enfrenta la minería como el decrecimiento en las leyes de las minas lo que involucra una mayor cantidad de mineral a transportar y con ello una mayor cantidad de camiones de extracción para sostener un volumen de producción, y también se debe al envejecimiento de los yacimientos, lo que implica, mayor profundidad de excavación y por tanto mayores distancias de acarreo del mineral desde su extracción hasta su procesamiento.

Figura 15 Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2021



Fuente: Cochilco



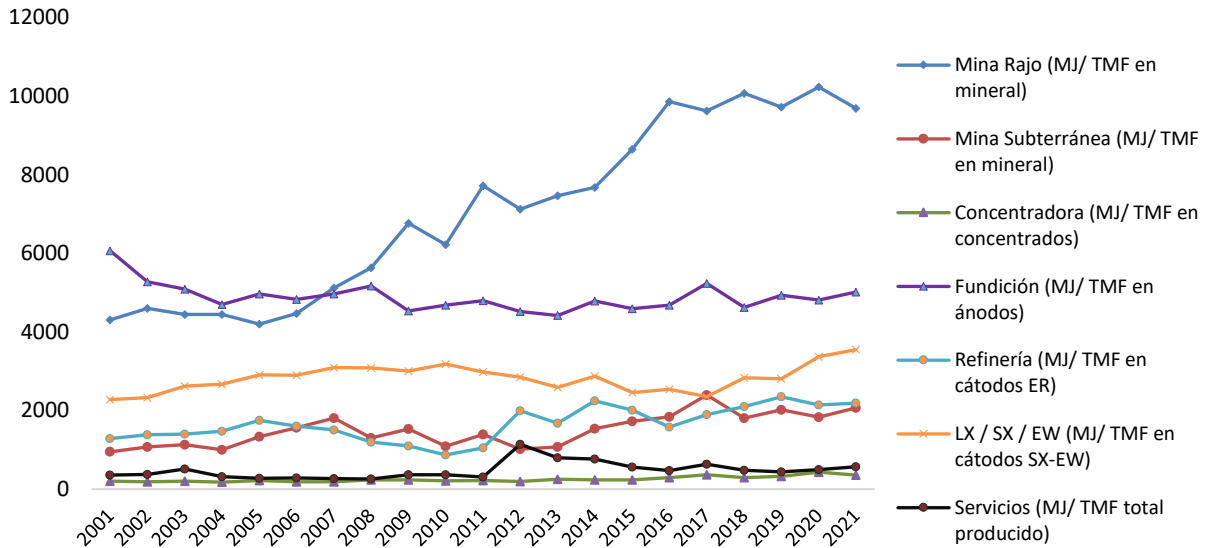
A su vez, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles que representa un 7,3% del total de combustibles usados en minería el 2021, disminuyó en un 31,0% entre el 2001 al 2021 aun cuando su nivel de procesamiento se ha mantenido en el período analizado.

Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha mantenido con participaciones anuales inferiores al 6 % en cada proceso.

4.3 Consumos unitarios

Por otra parte, la Figura 16 ilustra los consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido. Se destaca el proceso de mina rajo, proceso ha crecido en prácticamente todos los años, pasando de 4.308 MJ/TMF en 2001 a 9.682 en 2021 (+124,8%), evidenciando el impacto de las disminuciones en las leyes de mineral. En los demás procesos, los consumos unitarios de combustibles se han mantenido más bien estables durante los últimos 20 años, observándose si al proceso de Fundición que ha disminuido un poco de 6.064 a 5.017 MJ/TMF (- 18,7%) entre 2001-2021.

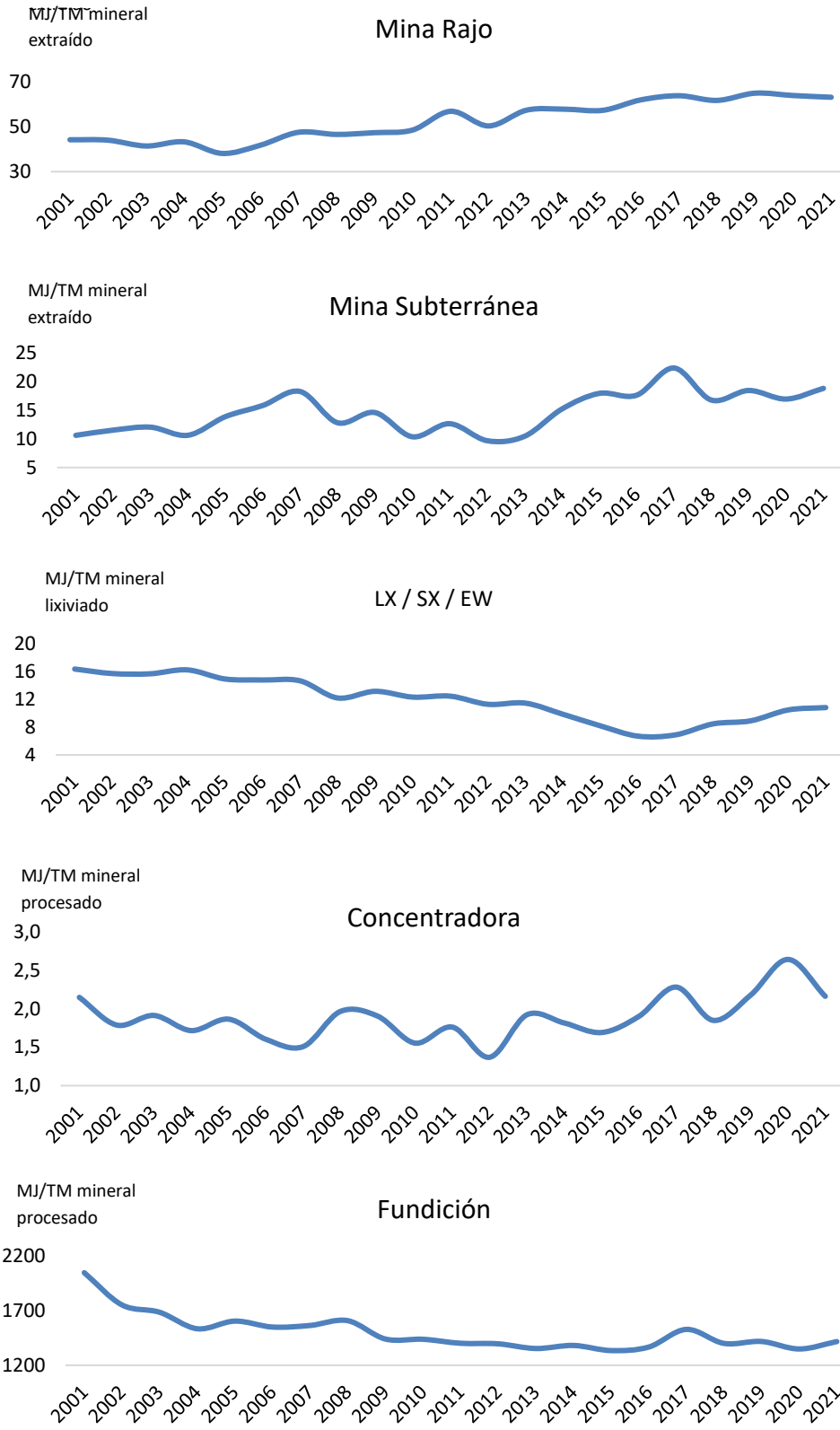
Figura 16 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF). 2001-2021



Fuente: Cochilco

Al analizar el uso de combustible en la mina rajo respecto del mineral extraído (Figura 17), el promedio ponderado país se incrementa en 41,3% entre el 2001 al 2021 de 44,2 MJ a 62,4 MJ por tonelada de mineral extraído. Esto se debe, por una parte, a que las leyes promedio de los minerales extraídos han disminuido con los años, lo que hace que para obtener la misma cantidad de fino sea necesario extraer más mineral. Por otro lado, si se toma en cuenta que a principios de la década del 2000 entraron en operación diferentes minas rajo abierto, y estas a medida que han avanzado su explotación, lo mismo que las más antiguas, sus distancias y pendientes de acarreo, tanto de los minerales como de los materiales estériles van aumentando, con el consiguiente aumento de consumo de combustibles.

Figura 17 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de material procesado, 2001-2021



Fuente: Cochilco



En Figura 17 también destaca, en la Fundición que tiene consumos unitarios de combustible por tonelada de concentrado procesado bastante altos, estos han ido decreciendo en el tiempo, producto de los cambios tecnológicos (detención de hornos reverbero y la utilización de equipos de fusión autógenos (que queman el azufre)) que las fundiciones han debido instalar para dar cumplimiento a las normas ambientales de calidad del aire, teniendo así una disminución entre el 2001 al 2021 del 30,8%, de 2.046 a 1.417 MJ/TM concentrado procesado, por otro lado en el proceso de Lixiviación ha disminuido de 16 a 11 MJ/ TM mineral lixiviado (-33,9%), lo que es indicativo de mejoras operacionales o de gestión.

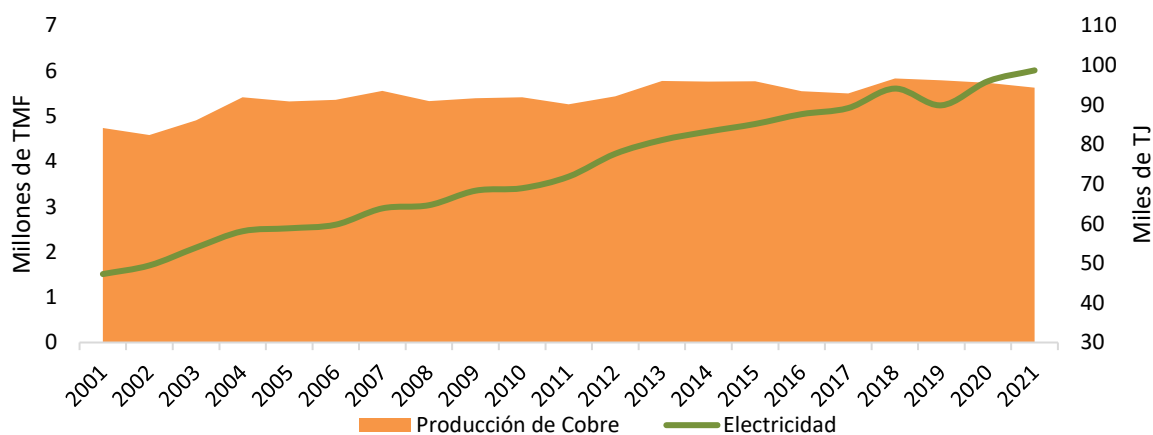
5. Consumo eléctrico

En esta sección se analiza el consumo y variación anual del consumo de 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.

5.1. Consumo agregado

El año 2021 la minería del cobre consumió un total de 98.686TJ en energía eléctrica, registrando así un leve aumento del 2,9% respecto al 2020, y comparado con el 2001 se registró un aumento del 108,8% como se puede observar en la Figura 18. El aumento 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.

Figura 18 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001-2021



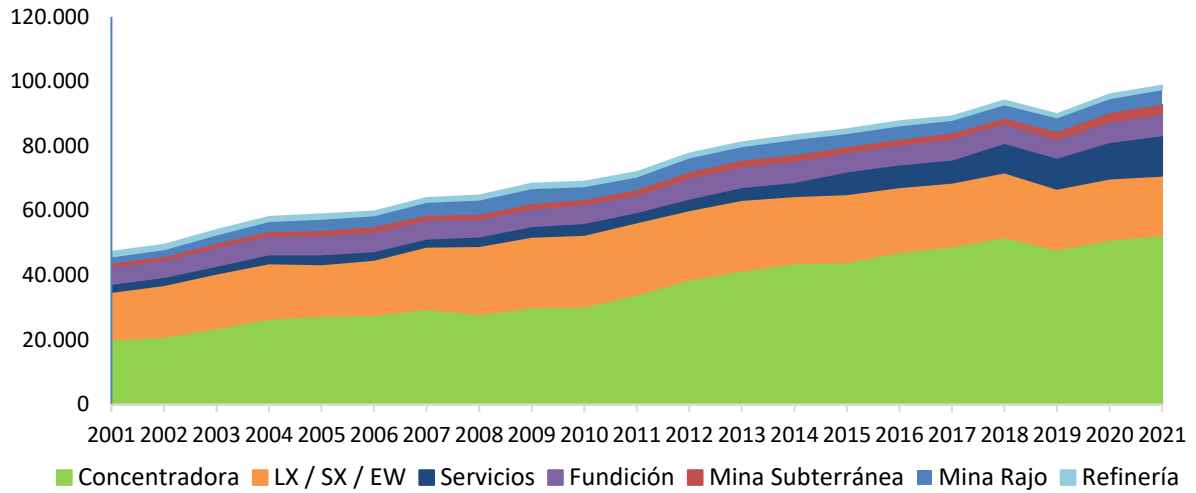
Fuente: Cochilco

5.2. Consumo por procesos

Como se puede ver en la Figura 19, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando de 20.141 TJ (42,6% del total de consumo electricidad de la minería) en 2001 a 52.389 TJ (53,1% del total) en 2021. Por otra parte, el consumo eléctrico en lixiviación, la segunda mayor fuente de consumo eléctrico, si bien ha aumentado su consumo eléctricos en términos absolutos

de 14.679 TJ en 2001 a 18.431 TJ en 2021, decreció en su participación desde el 31,0% al 18,7% en igual período.

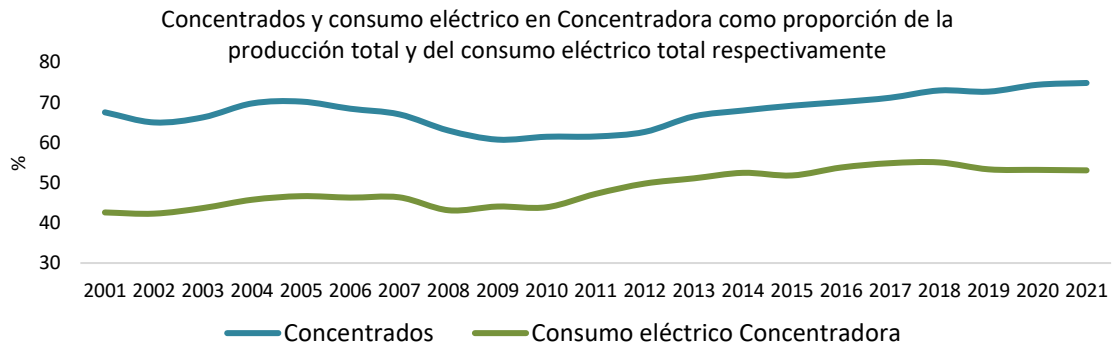
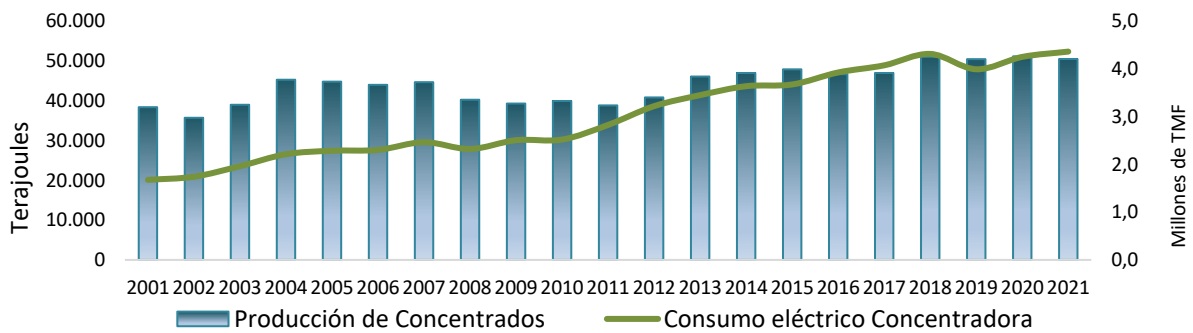
Figura 19 Evolución en el consumo de electricidad por proceso, 2001 – 2021



Fuente: Cochilco

En Figura 20 se puede observar el aumento en un 31,5% en la producción de concentrados entre el 2001-2021 pasando del 67,5% de la producción cuprífera nacional al 74,9% el mismo periodo, lo cual incide directamente en un mayor consumo de electricidad señalado anteriormente.

Figura 20 Producción de concentrados y consumo eléctrico en Concentradora en la minería del cobre, 2001 – 2021

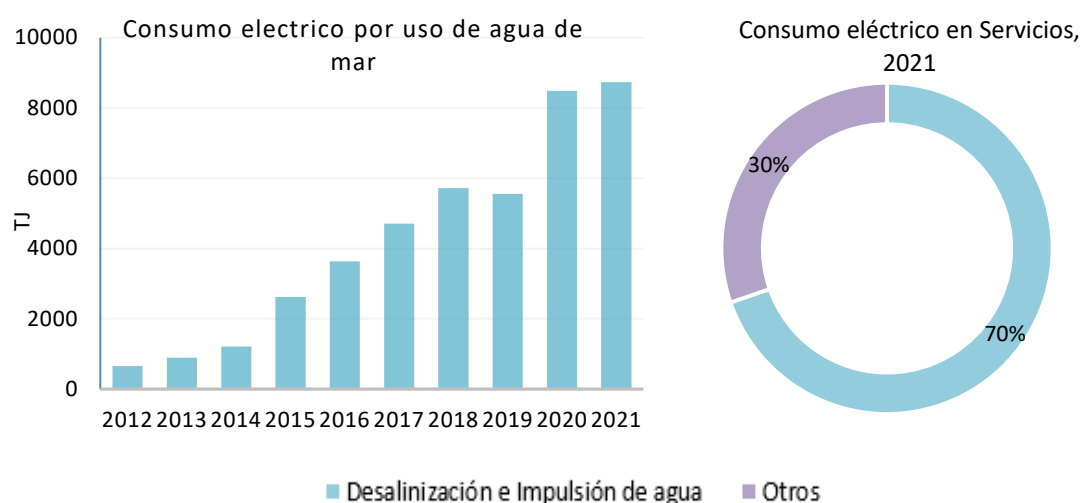


Fuente: Cochilco



El otro proceso que ha ido intensificando su demanda de electricidad es el de Servicios y que ha crecido un 403,5% entre el 2001 al 2021, cabe señalar que en esta etapa está incluido desalación e impulsión de agua (desalinizada o directa de mar). Es así como, dada las restricciones de agua continental en el norte del país, el proceso que ha crecido rápidamente en su uso de electricidad es la desalación e impulsión de agua a las faenas mineras y ya en 2021 con plantas que ahora operan a su total capacidad como la Planta Desaladora Coloso. En efecto, como se advierte en la Figura 21, este crecimiento del consumo de energía eléctrica para transporte y desalación de agua en la minería del cobre prácticamente se ha multiplicado 13,3 veces en los últimos 9 años, desde 658 TJ en 2012 a 8.729 TJ en 2021, lo que equivale al 69,7 % del consumo eléctrico en Servicios y al 8,8% del consumo eléctrico total de la minería en 2021.

Figura 21 Desalinización e impulsión de agua de mar, 2012-2021



Fuente: Cochilco

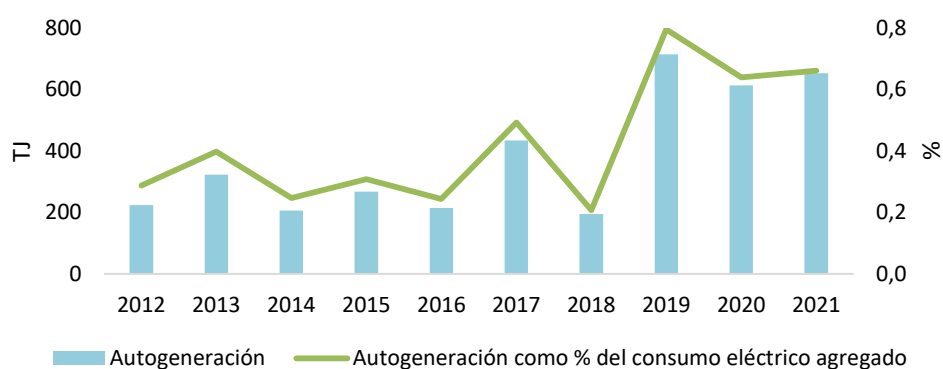
El crecimiento reciente evidencia una solución ante las cada vez mayores restricciones de agua continental que afecta a gran parte del territorio minero nacional. Lo anterior hace necesario un análisis más profundo por parte de la autoridad tanto en materia de políticas públicas y planes de desarrollo 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, y asimismo en un manejo integrado de cuencas que permita evaluar ambientalmente la sumatoria de plantas desadoras por zona, y como herramienta de planificación.

5.3. Autogeneración de energía eléctrica

A raíz de una demanda energética creciente, algunas empresas han recurrido a su propia autogeneración, sea a través de sus propias plantas generadoras de energía eléctrica en base a diésel, mediante plantas de Energías Renovables No-Convencionales (ERNC) o bien a través del reaprovechamiento energético en sus procesos productivos como en el caso de minera los pelambres que utiliza una cinta transportadora de minerales que produce su propia electricidad. Con todo, como se aprecia en la Figura 22, se estima que la autogeneración alcanzó en 2021 los 653 TJ,

equivalentes al 0,7% del consumo eléctrico total en la minería del cobre. Desde el 2012 la autogeneración de electricidad ha ido creciendo y ya al 2021 se ha duplicado prácticamente.

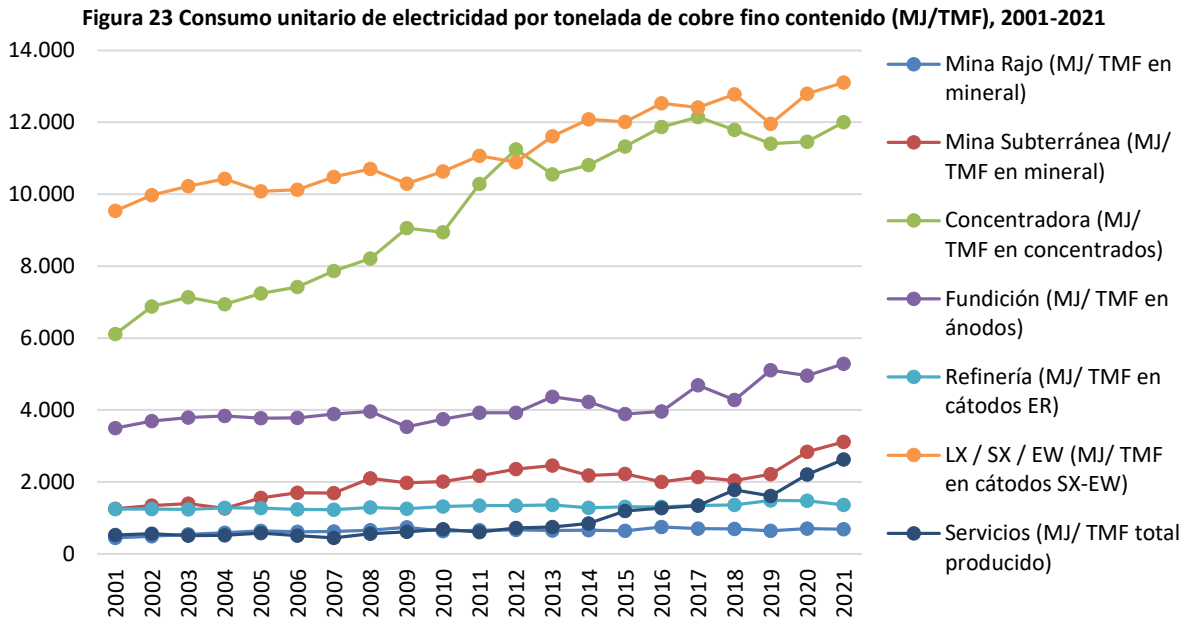
Figura 22 Autogeneración de energía eléctrica, 2012-2021



Fuente: Cochilco

5.4. Consumos unitarios

La Figura 22 presenta los consumos unitarios de electricidad por tonelada de cobre fino contenido. Destaca en primer lugar el progresivo incremento del consumo unitario de energía eléctrica en el proceso de Concentradora, que ha crecido de 6.112 a 12.000 TJ/cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 96,3% en el periodo 2001 – 2021. La concentradora es una etapa del proceso de producción de cobre altamente consumidora de energía eléctrica, la que se destina especialmente a las operaciones de chancado y molienda del mineral. Con el envejecimiento de las minas, los yacimientos se hacen más profundos y la roca se endurece, lo cual incide directamente en el proceso de conminución y se necesite más electricidad que antes para este subproceso.

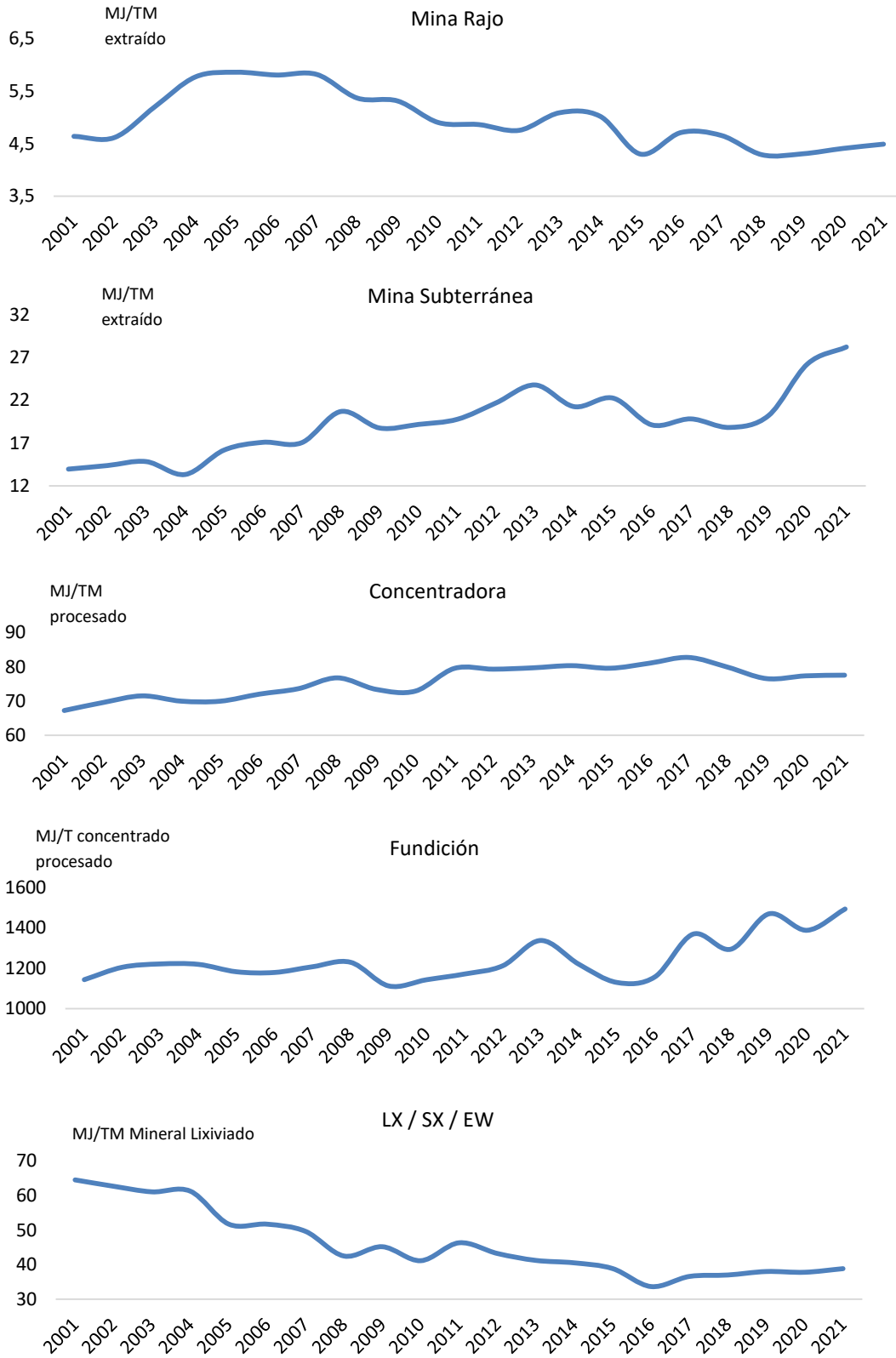


Fuente: Cochilco

Otro proceso que ha experimentado alzas constantes en su consumo unitario de electricidad ha sido el de LX-SX-EW, de 9.542 a 13.104 TJ/ cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 37,3% desde el 2001. El proceso Servicios se ha quintuplicado, este aumento se debe principalmente al uso de plantas desalinizadoras e impulsión del agua de mar (directa o desalinizada) Ver Figura 23, en tanto Fundición creció un 51,3 % debido fundamentalmente a la implementación de normativa de calidad del aire lo que ha significado que las fundiciones deban instalar sistemas de captación y manejo de gases, así como plantas de ácido sulfúrico, con el consiguiente incremento en el consumo de energía eléctrica. Además, varias fundiciones llevaron a cabo proyectos de modernización en el período analizado, que han involucrado la instalación de sistemas de transporte e inyección de concentrado seco, como también la instalación de hornos eléctricos para el tratamiento pirometalúrgico de las escorias.



Figura 24 Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral extraído/procesado (MJ/TM), 2001-2021



Fuente: Cochilco



Al ver en Figura 24 el proceso de concentración en su consumo de electricidad por tonelada de mineral procesado en los últimos 20 años, este se ha mantenido estable, si con incrementos en la mayoría de los años, aunque con mayor moderación que en su consumo unitario por cobre fino contenido, acumulando al 2021 un alza de 15,4%, teniendo en la primera década del 2000 un promedio de 72 MJ/T Concentrado Procesado y en la última década de 79 MJ/T Concentrado Procesado. Otro proceso que ha crecido entre el 2001 al 2021 es la mina subterránea en un 102,2 % llegando a 28 MJ/Tonelada de mineral extraído, este consumo unitarios de electricidad es por lo menos 6 veces más que la mina rajo, ello se debe fundamentalmente a que la minería subterránea requiere más electricidad para el uso intensivo de aire comprimido y servicios de ventilación. En paralelo, el consumo unitario del proceso de LX-SX-EW, ha caído un 39,8 % en el período 2001-2021 principalmente a causa de una extracción de mineral que crece a una tasa más rápida que el consumo eléctrico asociado a lixiviación y electro-obtención de cátodos, cuya producción se ha mantenido relativamente estable en el tiempo.

Cabe señalar que en año 2021, se incrementó el consumo de energía eléctrica y sus consumos unitarios en la mina subterránea como se observa en Figuras 22 y 23 en los últimos dos años, ello evidencia el impacto de la aparición de una nueva operación con este método de extracción como lo es Chuquicamata Subterránea.

Si bien hoy la producción de cobre en Chile se extrae mayoritariamente de operaciones a rajo abierto, el envejecimiento natural de las minas conlleva a un mayor consumo de combustibles en el transporte del mineral a procesar, lo que implica mayores costos y también mayores emisiones de gases de efecto invernadero, es así llegará en el largo plazo un punto de inflexión en que el método de extracción por rajo no sea rentable de seguir profundizando y ampliando el rajo, entonces en caso de tener el yacimiento reservas de mineral en profundidad podría pasar a un método extracción subterránea si ello es viable técnica y económicamente. La minería subterránea, es un proceso que se caracteriza por una extracción más selectivo sin lastre que puede reducir los volúmenes de material extraído y que es más intenso en el consumo de electricidad en su extracción.

Los valores de los demás procesos se mantienen en general estables en el tiempo, lo que demuestra que en el período no se han producido mayores cambios en fundiciones y en las refinerías electrolíticas que operan en el país, todas las cuales utilizan tecnología convencional y las diferencias entre ellas se deben a las distintas densidades de corriente que utilizan y al tamaño de los cátodos.

6. Mercado eléctrico y sistema eléctrico nacional

El mercado eléctrico en Chile, desde el lado de la oferta de energía, está compuesto por tres sectores que permiten la disposición de la energía eléctrica:

- Generación: sector que tiene como función la producción de la energía eléctrica a través de distintas tecnologías tales como la hidroeléctrica, termoeléctrica, eólica, solar, entre otras.



- Transmisión: sector que tiene como función la transmisión, en niveles altos de voltaje, la energía producida a todos los puntos del sistema eléctrico.
- Distribución: sector que tiene como función el distribuir, en niveles de voltaje más reducidos que los de Transmisión, la energía desde un cierto punto del sistema eléctrico a los consumidores regulados que este sector atiende.

Estas actividades son desarrolladas por completo por empresas privadas, las que realizan las inversiones necesarias dentro de la normativa específica que rige para cada uno de estos sectores. Así, los sectores de transmisión y distribución se desarrollan dentro de un esquema de sectores regulados, por la característica de monopolio que tienen ambos sectores, mientras que Generación lo hace bajo reglas de libre competencia. Dentro de las características de los sistemas eléctricos en el territorio nacional hoy, está que el mercado eléctrico chileno está compuesto por tres sistemas independientes: el Sistema Eléctrico Nacional (SEN, que cubre desde Arica por el norte, hasta la isla de Chiloé por el sur), el Sistema de Aysén (SEA, que cubre la Región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo), y el Sistema de Magallanes (SEM, que cubre la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena).

La minería del cobre chilena, ubicada en el norte y centro sur del país se abastece del SEN. Este nace en el año 2017, a partir de la unión de los dos principales sistemas de energía en el país: el Sistema Interconectado Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC) y ya en pleno funcionamiento desde el año 2018. Este sistema está conformado por un conjunto de instalaciones de centrales eléctricas generadoras, líneas de transporte, subestaciones eléctricas y líneas de distribución, interconectadas entre sí, que permite generar, transportar y distribuir energía eléctrica, cuya capacidad instalada de generación sea igual o superior a 200 Megawatt, todo ello dirigido ahora por un solo organismo, el Coordinador Eléctrico Nacional. En relación a la ampliación de las capacidades de generación local y/o transmisión de electricidad, se han impulsado una serie de proyectos enfocados a optimizar la operación del SEN, lo que hará posible ampliar las capacidades actuales y contar con menores precios de suministro.

Con la creación del sistema interconectado el país ha podido optimizar el uso de los recursos de generación ya disponibles y a su vez ha dado flexibilidad a la matriz nacional para integrar un mayor porcentaje de energías más limpias y con menor emisión de gases de efecto invernadero como las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) por ejemplo la eólica, solar, que tienen un alto potencial en el norte del país, pero presentan características disímiles en cuanto a su patrón de generación, aprovechando así el actual gran desarrollo tecnológico de estas energías y de su almacenamiento, así como la disminución de sus costos en los últimos años (haciéndolas más convenientes que algunas energías convencionales).

Es así como la creación del SEN ha permitido avanzar hacia una mayor seguridad en el abastecimiento de electricidad nacional a sus clientes dentro de ellos el sector minero y está suministrando energía de forma más eficiente y sustentable.



7. Consumo energético minero sustentable

En el contexto de la revolución energética que Chile ha llevado a cabo en los últimos años, que ha hecho posible avanzar en mejoras significativas para un escenario eléctrico más eficiente y sustentable, aprovechando el gran potencial del país para la generación de energías renovables y hacer posible la integración actual y futura de esta energía limpia a la matriz energética nacional, la minería chilena ha realizado y está progresando significativamente en el uso de las energías renovables, integrando estas energías a las operaciones mineras de distinta forma:

- a) Uso Directo de energías renovables en algún proceso (ejemplo calentamiento soluciones en lixiviación), mediante un proyecto de energías renovables desarrollado por la propia minera para su abastecimiento;
- b) A través de contratos PPA (Power Purchase Agreements) en los que la minera ha participado en la inversión del proyecto de energías renovables
- c) A través de contratos PPA en los que la minera como cliente solicita a su generador que el suministro sea con energías renovables

Esta última forma de integración ha sido la principal opción elegida por las operaciones mineras chilenas con poderosos procesos de renegociación de sus contratos eléctricos, diversas minas han terminado sus PPA pagando multas significativas, con el objetivo de iniciar contratos con energías renovables y con precios más convenientes. Otras compañías mineras si bien han optado por vender sus acciones en proyectos de energías renovables para concentrarse en el negocio minero, se siguen abasteciendo a través de contratos PPAs de estos proyectos de energías renovables.

Por ello, se ha decidido integrar una nueva pregunta en encuesta EMPAE en relación a porcentaje de uso de energías renovables en el consumo de electricidad de cada minera y que en futuros informes permitirá contabilizar con información provista por las compañías mineras, sobre el porcentaje de uso de renovables dentro del total de consumo eléctrico del sector.

Cabe señalar, que si bien esta integración de energías renovables en la matriz energética nacional es muy positivo para un desarrollo sustentable del sector minero, este suministro creciente con fuentes limpias debe complementarse con un mejoramiento continuo de la eficiencia energética y con una gestión de la energía en una minería sustentable líder en la mitigación al cambio climático, debe incluir el mejoramiento continuo de la eficiencia energética y con una gestión de la energía. Por tanto es importante que la industria minera del cobre siga incrementando la eficiencia energética en uso de electricidad y combustibles en aquellas faenas que ya han comenzado en esta senda y desarrollar esta línea de trabajo en las faenas donde no se ha realizado aún. Por ello el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y dentro de sus divisiones, con la eficiencia energética es relevante, ya que permitirá la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo el negocio minero. Actualmente la Ley de Eficiencia Energética promulgada el 2020 por el Ministerio de Energía establece que el sector minero entre otros principales consumidores de energía en el país debe realizar una gestión activa del consumo de energía por lo que deberán implementar sistemas de gestión de energía y además deberán reportar sus parámetros energéticos anualmente para su debida fiscalización, con los que el Ministerio



elaborará anualmente un reporte público, con ello se busca promover mejoras continuas y reducción de emisiones.

En la materia, cabe destacar que ya en 2015 el Consejo Minero (CM), como representante de la gran minería, y el Ministerio de Energía, firmaron un Convenio de colaboración orientado a impulsar un uso cada vez más eficiente de la energía en las empresas que componen esta asociación y a fomentar iniciativas que contribuyan a la innovación y la cultura en el buen uso de la energía, siguiendo las mejores prácticas internacionales en la materia. Es así como el sector minero fue el primero en firmar un acuerdo de este tipo, anticipando la implementación de las normas que se establecerán, respecto de los grandes consumidores de energía, en el proyecto de Ley de Eficiencia Energética, en el marco de la Agenda de Energía del Ministerio de Energía. Por su parte, Codelco, aunque integra el CM, firmó un convenio directo con el Ministerio de Energía sobre la misma materia, dada su condición de empresa pública. Dentro de los principales compromisos del Convenio de colaboración a) la industria minera se sometió a auditorías energéticas independientes con el objetivo de identificar oportunidades de mayor eficiencia energética relacionadas con mejoras operacionales, mantenimiento, reemplazo de equipos e introducción de nuevas tecnologías b) Compromiso de implementar Sistemas de Gestión de Energía con estándares internacionales o fortalezcan sistemas de este tipo con los que ya cuentan; c) Reportar informes de avances en materia de eficiencia energética.

Otro importante avance público privado en la materia se puede ver en página web del Proyecto eficiencia energética en la minería <https://www.energiaenmineria.cl/>, ejecutado entre el 2019 y 2022, financiado por Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección al Consumidor de Alemania (BMUV) gestionado por GIZ Chile siendo contrapartes el Ministerio de Energía de Chile y la Agencia de Sostenibilidad Energética.

Este Proyecto consideró la creación de una Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones en el sector minero en Chile, en el que el objetivo común es mejorar gestión energética de mineras o implementar medidas de eficiencia energética, valiéndose para lograrlo del intercambio de experiencias, problemáticas y recursos mutuos. De este grupo de trabajo se recopiló una serie de medidas de eficiencia energética aplicables a distintos procesos mineros que están publicadas en el sitio web.

8. Gasto energético

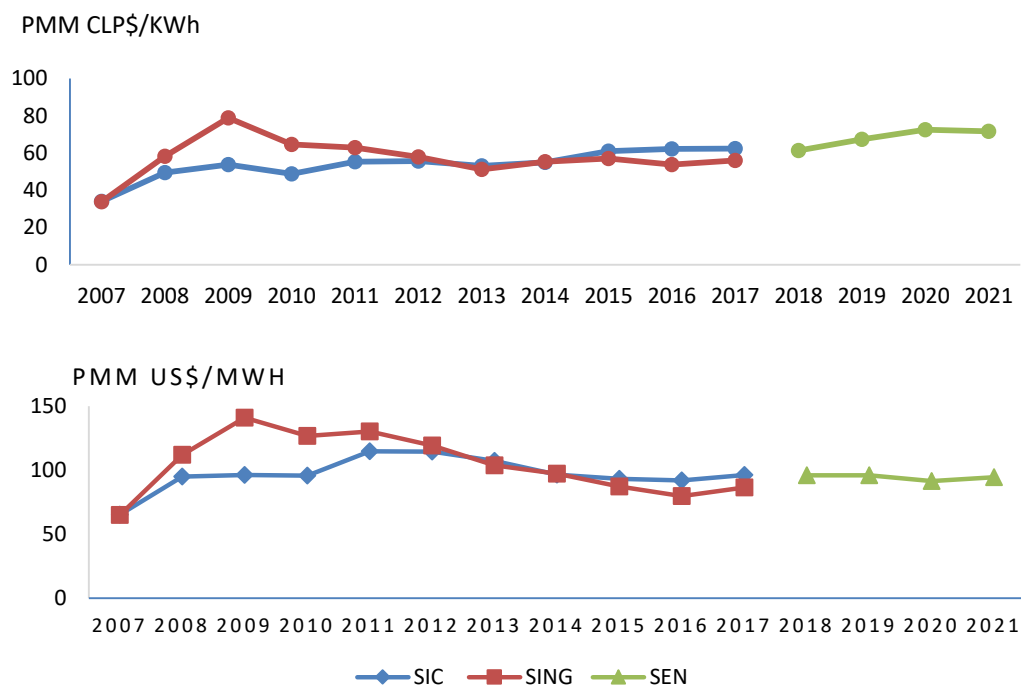
Una vez determinados los consumos energéticos en electricidad y combustibles, podemos estimar los costos incurridos en base a los precios de mercado. Para el caso del consumo eléctrico, empleamos los Precios Medios de Mercado (PMM) del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) a partir de su funcionamiento a fines del 2017. Para el caso del consumo de combustibles, ocupamos los precios internacionales de los hidrocarburos. Cabe señalar que todos los costos y precios han sido ajustados por el Índice de Precios de Producción (IPP) minera al año 2021 a fin de hacer comparables los valores en el tiempo.

El Precio Medio nominal de Mercado (PMM) se determina considerando los precios medios de los contratos de clientes libres y suministro de largo plazo de las empresas distribuidoras, según



corresponda, informados a la Comisión Nacional de Energía por las empresas generadoras del Sistema Eléctrico Nacional, respectivamente. El PMM año 2021 es de 71,7 \$/KWh, valor nominal que es un 1,1 % menor que el 2020 y 17 % más que el 2018.

Figura 25 Evolución del precio medio nominal de mercado de sistemas SIC,SINGy SEN en \$/kWh y USD/MWh

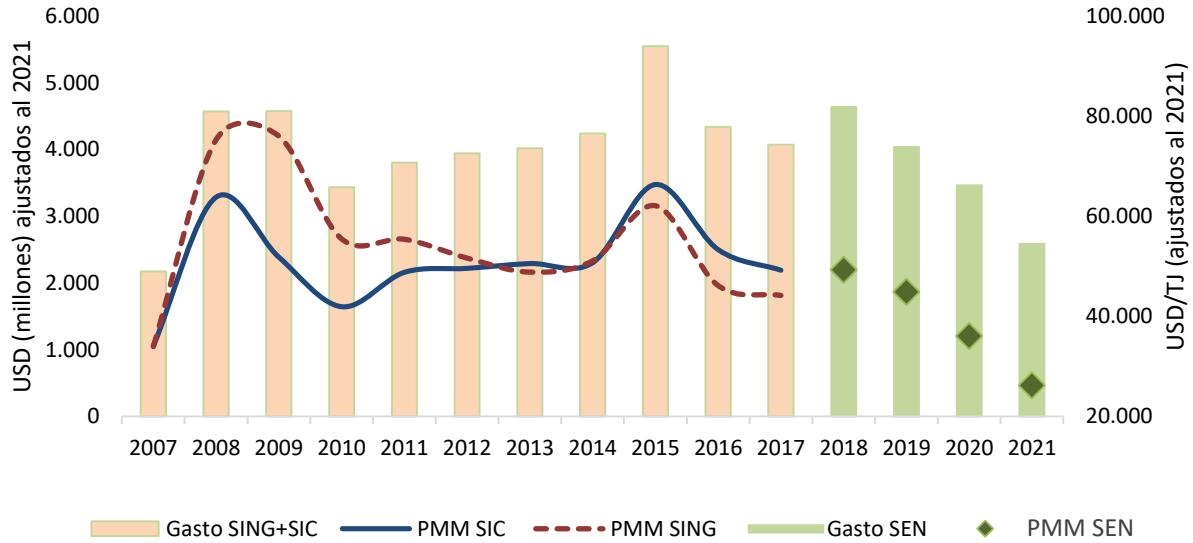


Fuente: Anuario 2021 de la Comisión Nacional de Energía

Para calcular el gasto por concepto de electricidad en minería del cobre se utiliza el PMM de los sistemas eléctricos nacionales en dólares por terajoule, utilizando la tasa de cambio de pesos a dólar promedio del año y usando IPP minería para ajustar a valor 2021.

Es así como figura 26 muestra que en el 2021 el PMM del SEN es de 26.231 USD/TJ y el gasto en electricidad minero ese año es de 2.589 millones USD. Al analizar la evolución en el tiempo del gasto en electricidad, se puede observar una disminución sostenida de este desde el funcionamiento del SEN en 2018, es así como entre el 2018- 2021 el gasto disminuyó un 44% y un 25% entre 2020 - 2021. Al respecto cabe señalar, que ello no implica necesariamente que el sector este consumiendo menor electricidad, de hecho el consumo eléctrico ha ido aumentando (ver capítulo 5 y figura18), la caída de los precios se explica por el impacto del ajuste del IPP de la minería nacional, que ha tenido una notable alza especialmente durante los últimos años.

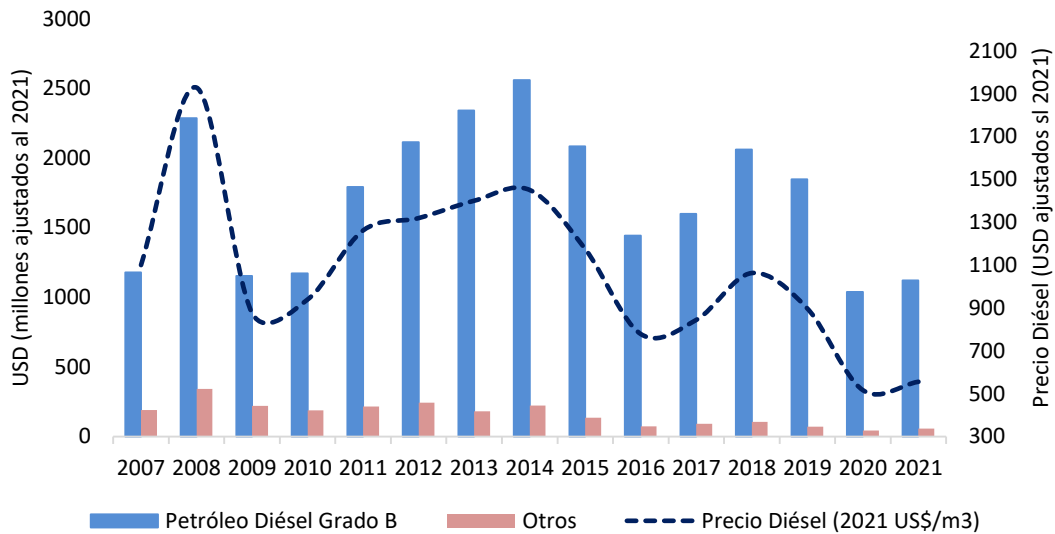
Figura 26 Gasto agregado en electricidad de la minería del cobre, 2007-2021



Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía

Por otra parte, en relación al gasto en combustibles, vemos de la Figura 27 que, en concordancia con un uso creciente del diésel en la minería cuprífera nacional, su gasto como proporción del consumo total de combustibles también ha aumentado, pasando de un 86,1% en 2007 a un 95,3% en 2021. Es decir, prácticamente la totalidad del gasto energético en combustibles reside específicamente en diésel, situación que provoca que los costos energéticos sean altamente dependientes de los precios internacionales del hidrocarburo.

Figura 27 Gasto agregado en combustibles de la minería del cobre, 2007-2021

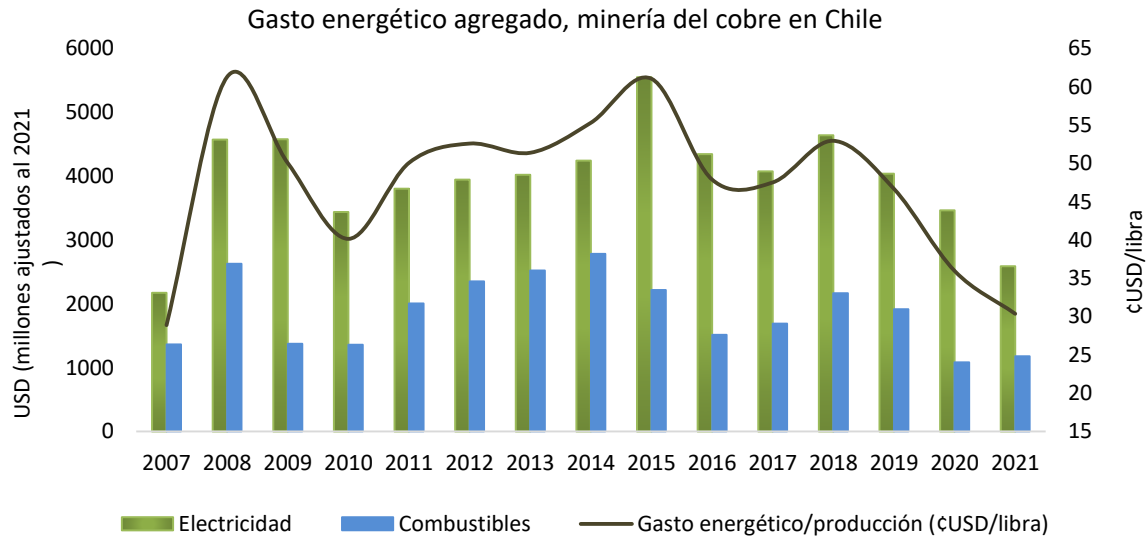


Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía



Ahora bien, integrando las dos fuentes de gasto energético, electricidad y combustibles, vemos de la Figura 28 que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con USD 2.589 millones frente a los USD 1177 millones del costo asociado al consumo de combustible durante el año 2021. Es decir un poco más que el doble, aun considerando que el PMM del SEN ajustado al 2021 ha ido disminuyendo desde su funcionamiento en 2018. Al mismo tiempo, el gasto energético por libra de cobre producida llegó a las ¢USD 30,4 un 42,6% menos en relación a los ¢USD 52,9 de 2018, debido a la reducción de los costos tanto de electricidad y combustibles.

Figura 28 Gasto energético agregado de la minería del cobre, 2007-2021



Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía

De lo anterior se puede desprender además el gasto en electricidad por TJ es sustantivamente mayor que en combustibles. En efecto, dado que los consumos agregados de combustibles y energía medidos en TJ son relativamente similares, tenemos que el gasto promedio por TJ en combustibles alcanza los \$9,6 millones, mientras que el gasto promedio por TJ en electricidad llegó a los \$19,9 millones. En suma, con estos datos el Observatorio de Costos de Cochilco estima que el consumo energético representa cerca del 11% de los costos de la minería del cobre en Chile (electricidad 8% y combustibles 3%).

9. Comentarios finales

La industria minera enfrenta los desafíos de un intenso y creciente consumo energético, la necesidad de que el suministro sea constante y seguro y la necesidad de desarrollar una producción sustentable lo que la hace necesitar del uso de energía compatible con el medio ambiente y de reducir las emisiones de gases efecto invernadero del sector.

En las últimas décadas ha habido un aumento progresivo en el consumo energético superior a los aumentos en la producción de cobre. Entre el 2001-2021 la producción nacional de cobre mina se presenta más bien estable y se ha incrementado un 19%. En tanto el consumo energético de la minería, ha aumentado un 115%. Desglosando por tipo de energía el consumo eléctrico ha aumentado un 109% y el de combustibles un 122%, en el período 2011-2021.

Lo anterior se atribuye a causas estructurales y de producción en la industria del cobre nacional. Por el lado de las causas estructurales, se encuentra el continuo y natural envejecimiento de las minas, lo que a su vez se relaciona con menores leyes del mineral (lo que implica mayor mineral a transportar y procesar para obtener igual cantidad de cobre que en años anteriores), a una roca más endurecida y a mayores distancias de acarreo, situación que en su conjunto aumenta los requerimientos energéticos, especialmente de combustibles pero también de electricidad. Ello se ve reflejado principalmente en el aumento en el consumo de combustibles de la mina rajo que se ha triplicado entre 2001 al 2021, llegando a representar en el 2021 el 79% del total combustible usado en minería del cobre.

En paralelo, se cuenta las restricciones a la extracción de agua continental, que ha impulsado a varias faenas a instalar plantas de desalación e impulsión de agua de mar hacia las faenas, proceso que es altamente intensivo en electricidad y que en el 2021 representa el 9% del consumo eléctrico total de la minería del cobre.

Atendiendo a las causas productivas, destaca la sucesiva mayor producción de concentrados de cobre debido al agotamiento natural de los minerales oxidados (32% de crecimiento concentrados versus 8% de decrecimiento en cátodos SX-EW en el periodo 2011-2021), lo que acrecienta la necesidad de energía, sobre todo eléctrica, por dos vías. La directa, mediante el proceso mismo de concentración de mineral intensivo en energía eléctrica, que en el 2021 representa el 53% del consumo eléctrico minero. La indirecta, por el mayor uso de agua en este proceso, lo que a su vez refuerza la tendencia al uso de agua de mar, intensivo en energía eléctrica.

A pesar de estos desafíos, actualmente el escenario de suministro energético en el país se presenta más favorable para el desarrollo de la minería del cobre que en años anteriores, en términos de que los precios de combustible y energía eléctrica se han mantenido relativamente estables y lejos de los altos niveles alcanzados diez años atrás.

Además el 2018 se concretó la integración de los Sistemas Interconectados Central y del Norte Grande en el llamado Sistema Eléctrico Nacional (SEN), lo que ha permitido avanzar al país hacia una mayor seguridad en el abastecimiento de electricidad y en la integración de energías renovables y renovables no convencionales, lo que ha permitido y permitirá disminuir los costos de electricidad, y realizar un suministro eléctrico más limpio y sustentable.



Por su parte, la minería del cobre está progresando en el uso de energías renovables y desde 2019 un importante número de empresas mineras han realizado procesos de renegociación de contratos eléctricos para suministrarse en los próximos años con energías limpias y a precios más convenientes. Cabe señalar, que lograr un suministro gradual y creciente de electricidad con energías renovables es muy positivo para un desarrollo sustentable del sector minero, este suministro creciente con fuentes limpias debe complementarse con un mejoramiento continuo de la eficiencia energética y con una gestión de la energía en una minería sustentable líder en la mitigación al cambio climático, debe incluir el mejoramiento continuo de la eficiencia energética y con una gestión de la energía. Por tanto es importante que la industria minera del cobre siga incrementando la eficiencia energética en uso de electricidad y combustibles en aquellas faenas que ya han comenzado en esta senda y desarrollar esta línea de trabajo en las faenas donde no se ha realizado aún. Por ello el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y dentro de sus divisiones, con la eficiencia energética es relevante, ya que permitirá la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo el 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 indudablemente 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.



10. Anexo: Operaciones consideradas

Tabla 3 Operaciones consideradas en la edición 2021 de la EMPAE

Nombre	Región	Tamaño
Pampa Camarones	XV	Med Min Cu
Cerro Colorado	I	Gran Min Cu
Collahuasi	I	Gran Min Cu
Quebrada Blanca	I	Gran Min Cu
Altonorte	II	Gran Min Cu
Antucoya	II	Gran Min Cu
Cenizas Taltal	II	Med Min Cu
Centinela	II	Gran Min Cu
Chuquicamata	II	Estatal
El Abra	II	Gran Min Cu
Escondida	II	Gran Min Cu
Franke	II	Med Min Cu
Gaby	II	Estatal
Lomas Bayas	II	Gran Min Cu
Mantos Blancos	II	Gran Min Cu
Mantos de la Luna	II	Med Min Cu
Ministro Hales	II	Estatal
Planta Salado	II	Med Min Est
Planta Taltal	II	Med Min Est
Radomiro Tomic	II	Estatal
Sierra Gorda	II	Gran Min Cu
Spence	II	Gran Min Cu
Zaldivar	II	Gran Min Cu
Atacama Kozan	III	Med Min Cu
Candelaria	III	Gran Min Cu
Caserones	III	Gran Min Cu
Mantoverde	III	Gran Min Cu
Ojos del Salado	III	Med Min Cu
Paipote	III	Med Min Est
Planta Matta	III	Med Min Est
Planta Vallenar	III	Med Min Est
Pucobre	III	Med Min Cu
Salvador	III	Estatal
Carola	III	Med Min Cu
San Andrés	III	Med Min Cu
Andacollo	IV	Gran Min Cu
Los Pelambres	IV	Gran Min Cu
Planta Delta	IV	Med Min Est
San Gerónimo	IV	Med Min Cu
Tres Valles	IV	Med Min Cu
Amalia Catemu	V	Med Min Cu
Andina	V	Estatal
Cenizas Cabildo	V	Med Min Cu
Cerro Negro	V	Med Min Cu
Chagres	V	Gran Min Cu
El Soldado	V	Gran Min Cu
La Patagua	V	Med Min Cu
Ventanas	V	Estatal
Los Bronces	RM	Gran Min Cu
El Teniente	VI	Estatal

Fuente: Cochilco



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

Rosana Brantes Abarca

Analista de Dirección de Estudios y Políticas Públicas

Con la colaboración de

Ada Contreras

Analista de Dirección de Estudios y Políticas Públicas

Víctor Garay

Director de Estudios y Políticas Públicas (S)

Octubre / 2022

