



Consumo energético de la minería del cobre al año 2023

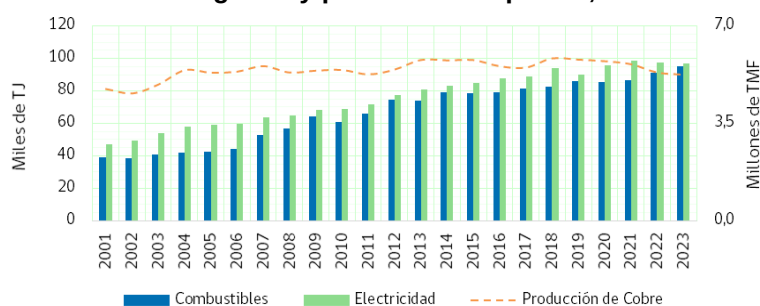
DEPP N° 17/2024

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 52 operaciones mineras, entre las que se encuentran gran y mediana minería, fundiciones y refinerías, en el año 2023 llegó al 99% de la producción de cobre nacional, específicamente 95% de la producción de cátodos electroobtenidos y 99% 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 transparente y acerca a la ciudadanía la realidad energética del sector y su real impacto e importancia energética en el país.

Consumo energético y producción cuprífera, 2001-2023



Fuente: Cochilco

Al 2023 la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 191.678 TJ, lo que representa alrededor del 14% del consumo agregado del país. De este total, 96.744 TJ son de la energía eléctrica y 94.934 TJ por consumo de combustibles. La Figura ilustra el consumo energético de electricidad y combustibles (50% del total respectivamente para 2023) y la producción de cobre fino desde el 2001 al 2023.

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 81.700 TJ que representa el 43% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 53.441 TJ (28%) y el proceso de Lixiviación con 21.790 TJ (11%). Para el caso del consumo de combustibles, la mina rajo se lleva el 81% del total de combustibles, seguido de lejos por fundiciones con un 6%. Para el consumo eléctrico en cambio, el proceso de concentradora es la fuerza dominante con un 53%, seguido de la electro-obtención con un 18%.

A nivel regional, Antofagasta es por lejos la región con mayor consumo energético con 113.268 TJ tanto en combustibles (53.849 TJ, equivalente al 63 % del total de combustibles durante 2023) como en electricidad (59.420 TJ, equivalente al 56 % 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 11%, las regiones de O'Higgins y Metropolitana con el 10% y la región de Arica y Parinacota con un 9%.

En relación al consumo por tamaño, la gran minería privada del cobre fue responsable del 71% del consumo energético minero a nivel nacional tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2023, mientras que la gran minería estatal, representada por Codelco, representa el 26% de combustibles y 25% 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 0,6% de combustibles y 1% de electricidad.

Los resultados de este trabajo evidencian que la minería del cobre continua enfrentando requerimientos energéticos crecientes, por temas estructurales como el envejecimiento y profundización de las minas, razones lastre mineral más desfavorables, el endurecimiento de la roca, la caída de las leyes de cobre, y la mayor necesidad de agua de mar lo que implica la construcción de plantas desalinizadoras y la impulsión de agua de mar (desalinizada o directa).

En relación a la integración de energías limpias, en el año 2023 el 74% de la demanda eléctrica total del sector minero es con suministro renovable, desglosando por tamaño de minería, Enami tiene un 100% de suministro eléctrico renovable, en tanto la gran minería un 93%, la mediana minería un 57% y Codelco tiene una de sus operaciones con contrato de suministro renovable y este suministro representa el 22% de su consumo eléctrico total.

En términos de los alcances de la Ley de eficiencia energética en el sector minero, se tiene en el año 2023 la totalidad de las operaciones de la gran minería del cobre, Codelco y Enami están afectos a esta Ley y califican como consumidores con capacidad de gestión de energía, en tanto en mediana minería, y de la mediana minería privada solo 3 operaciones no califican. Es así como se puede decir que el 94% del sector minero del cobre está afecto a la Ley de eficiencia energética y califica como consumidores con capacidad de gestión de energía.

Por último en términos de electromovilidad en el sector minero del cobre, ésta ya ha empezado a implementarse en transporte liviano como iniciativa para reemplazar combustible, ejemplos de ello son el uso de taxis y buses eléctricos para el traslado de trabajadores y de equipos en zonas de operación. El 86% de las operaciones de la gran minería del cobre ya tiene planes de electromovilidad y/o transporte bajo en emisiones y en Codelco el 75% de sus operaciones, en tanto en mediana minería, el 71% de sus operaciones cuentan con avances en la materia y en Enami la mitad de sus plantas tiene planes de electromovilidad.



Contenido

Resumen Ejecutivo	I
1. Introducción	1
2. Metodología	2
3. Muestra analizada	2
4. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional.....	3
4.1. Consumos totales	3
4.2. Consumos por procesos	4
4.3. Participación del consumo energético minero en el consumo nacional de energía.....	7
4.4. Consumos por región	7
4.5. Consumos por tamaño de minería	9
4.6. Consumos totales unitarios	13
5. Consumo de combustibles	15
5.1. Consumo agregado	15
5.2. Consumo por procesos	17
5.3. Consumos unitarios	18
6. Consumo eléctrico	21
6.1. Consumo agregado	21
6.2. Consumo por procesos	22
6.3. Autogeneración de energía eléctrica	24
6.4. Consumos unitarios	25
6.5. Integración de energías renovables en el 2023	28
6.6. Eficiencia Energética	30
6.6.1. Eficiencia energética en el 2023	31
7. Comentarios finales.....	33
8. Anexo:.....	36
8.1. Metodología: Información por proceso	36
8.2. Metodología: Análisis de los datos.....	37
8.2.1. Combustibles:	38
8.2.2. Energía Eléctrica:	39
9. Operaciones consideradas.....	40

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 refinería. 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, entre otros elementos. Esta información se publica en el Anuario COCHILCO: <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx> 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 y 3 presenta la metodología usada, exponiendo el alcance de la encuesta. Luego, en la sección 4, 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 5, 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).

En Anexo se encuentra mayor detalle de los pasos metodológicos usados en la confección de este Informe.

3. Muestra analizada

El año 2023 respondieron la encuesta un total de 52 operaciones mineras, entre las que se encuentran minas, fundiciones y refinерías, las que representan 99% de la producción de cobre nacional de 2023, 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.

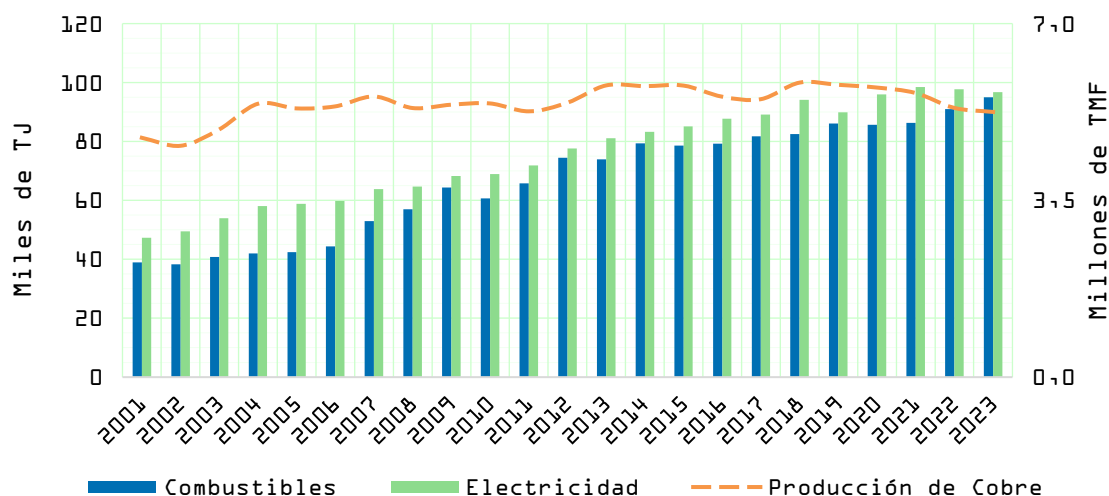
4. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional

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

4.1. Consumos totales

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.

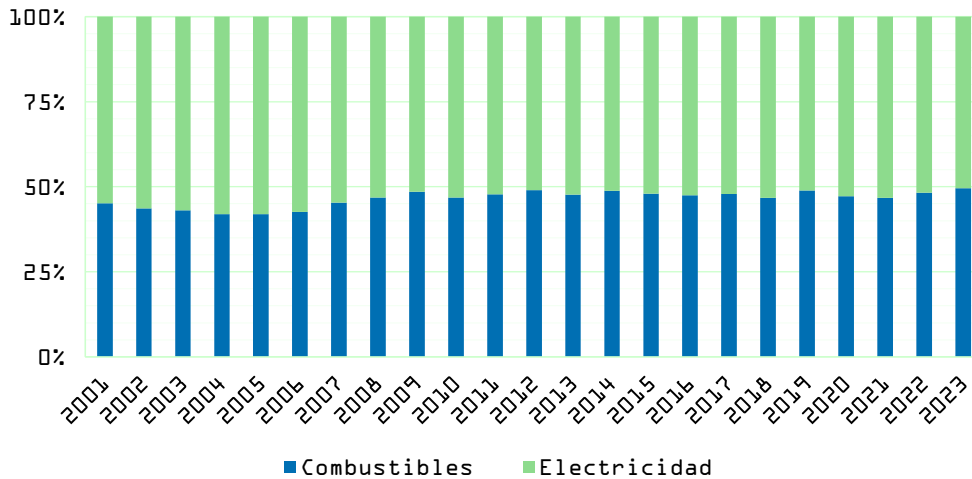
Figura 3 Consumos Totales de Energía de la Minería del Cobre vs Producción de Cobre Fino, 2001-2023



Fuente: Cochilco

Entre el 2001-2023 la producción nacional de cobre mina se presenta más bien estable, creciendo a una tasa promedio anual del 0,5%, llegando en el año 2023 a 5,25 millones de TM, lo que representa un aumento del 10,8% en el período analizado. En tanto el consumo energético de la minería, ha aumentado un 122,3% a una tasa promedio anual del 3,76%, llegando así a 191.678 TJ en el 2023 (Ver Figura 3). Comparando con el 2022, el consumo energético aumentó un 1,6 %, a su vez, la producción nacional de cobre mina disminuyó en 1,5%.

Figura 4 Participación según tipo de energía en el consumo total de energía de la minería del cobre, 2001-2023



Fuente: Cochilco

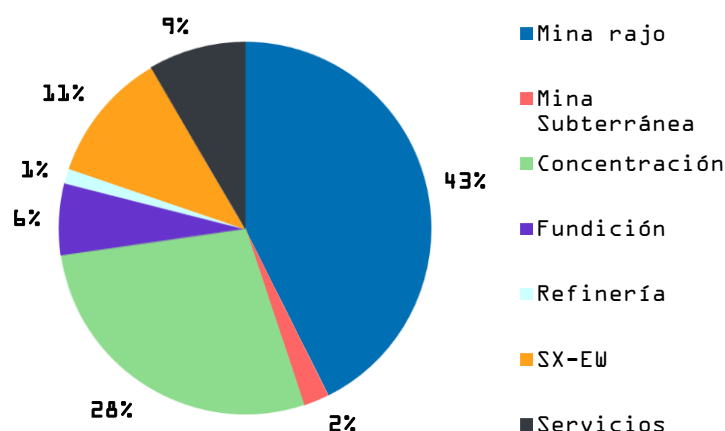
Al desglosar por tipo de energía entre el 2001-2023, como se muestra en Figura 4, el consumo de combustible aumenta en un 143,7%, en tanto el consumo de la electricidad aumenta en un 104,7% en el período.

La participación promedio en el período analizado para combustibles es del 46,6 % y 53,4 % en electricidad, en tanto para el año 2023 el consumo de combustibles logra una participación del 49,5% y la electricidad un 50,5%.

4.2. Consumos por procesos

A nivel de consumo energético por procesos, los tres más intensos son la mina rajo con 81.700 TJ que representa el 42,6% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 53.441 TJ (27,9%) y el proceso de Lixiviación con 21.790TJ (11,4%). Cabe mencionar que de estos tres procesos, el único que llega a producto final es el de Lixiviación con los cátodos, en tanto mina como concentradora requieren procesos adicionales para alcanzar producto final.

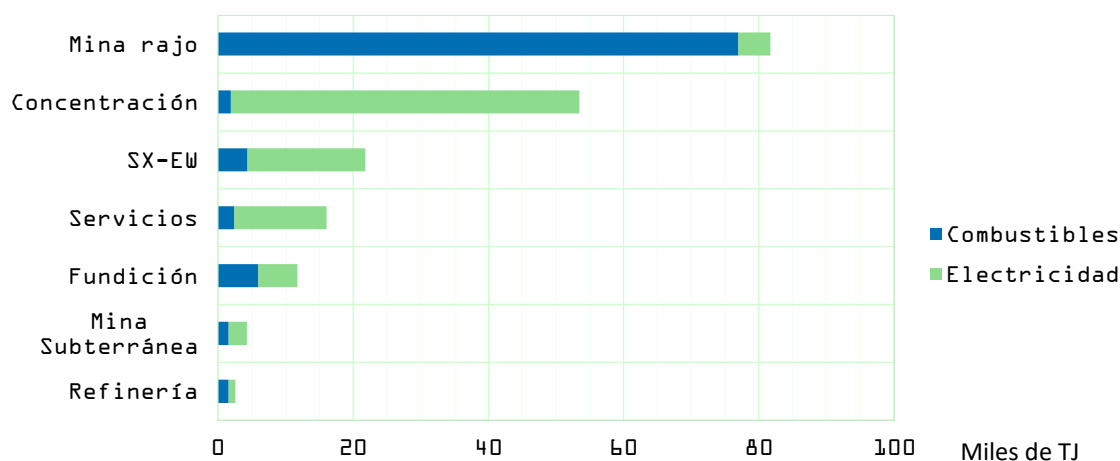
Figura 5 Participación en consumo de energía por proceso, 2023



Fuente: Cochilco

Desglosando por tipo de energía utilizada en cada proceso, el consumo de combustibles en la mina rajo conlleva 76.965 TJ, en cambio en el proceso de concentración y lixiviación la fuerza dominante es el consumo eléctrico con 51.489 TJ y 17.405 TJ respectivamente. La Figura 6 a continuación resume los consumos por proceso y tipo de energía para el año 2023.

Figura 6 Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre, 2023

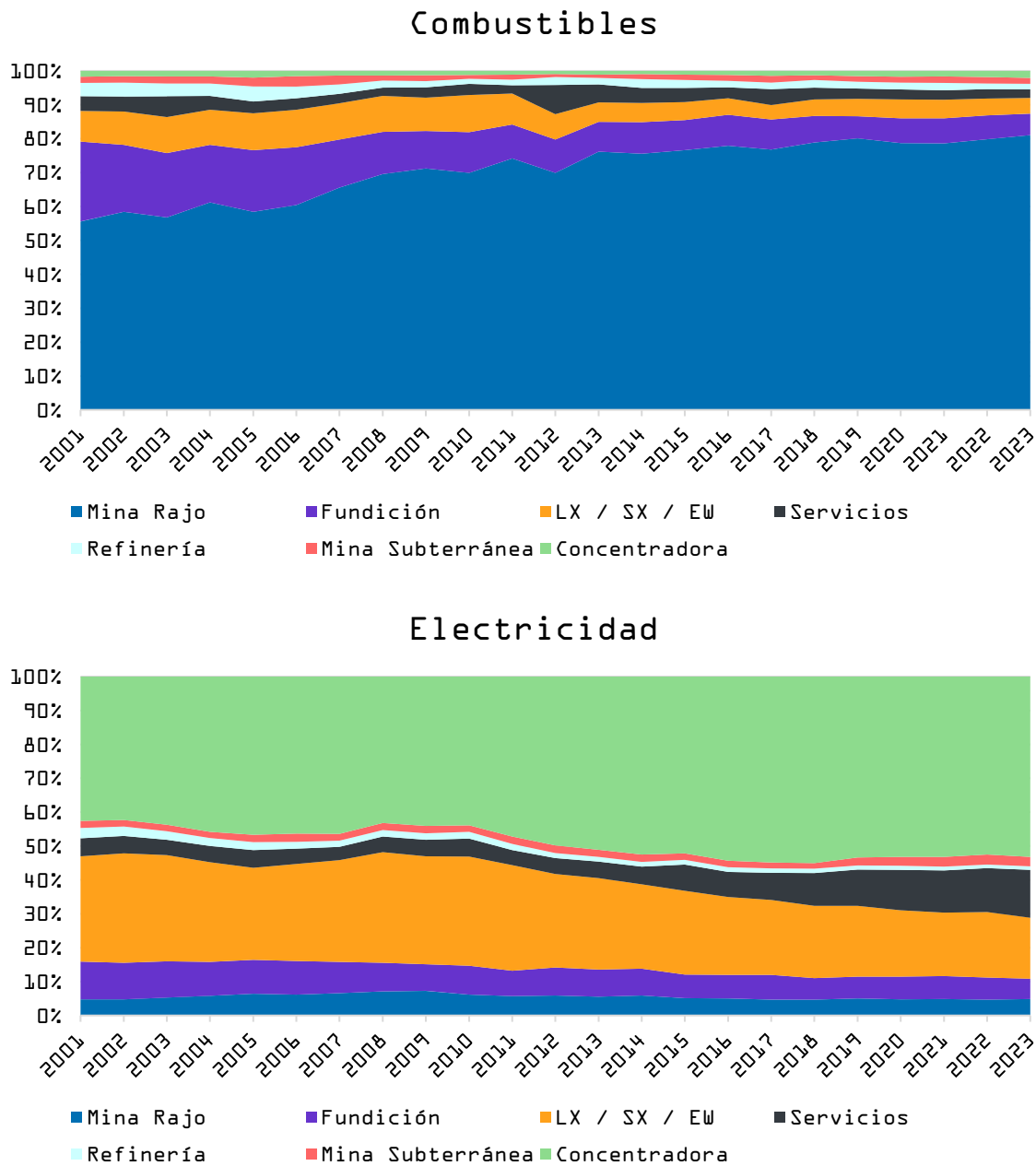


Fuente: Cochilco

Analizando la evolución entre el 2001 al 2023, 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 81,1% en 2023. Por el lado de la electricidad, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando del 42,6% del total en 2001 al 53,2% en 2023, en tanto el otro

proceso que demanda electricidad después de la concentradora es el de Lixiviación y este en el 2001 representaba el 31,1% del consumo eléctrico ese año para pasar a tener una participación del 18,0% en el 2023. Esta baja de participación en el proceso de lixiviación se explica mayormente por una menor producción de cátodos SX-EW: 13% de decrecimiento en el periodo 2021-2023, debido al agotamiento de minerales oxidados.

Figura 7 Evolución en la participación (%) por proceso en el consumo de combustibles y electricidad, 2001-2023

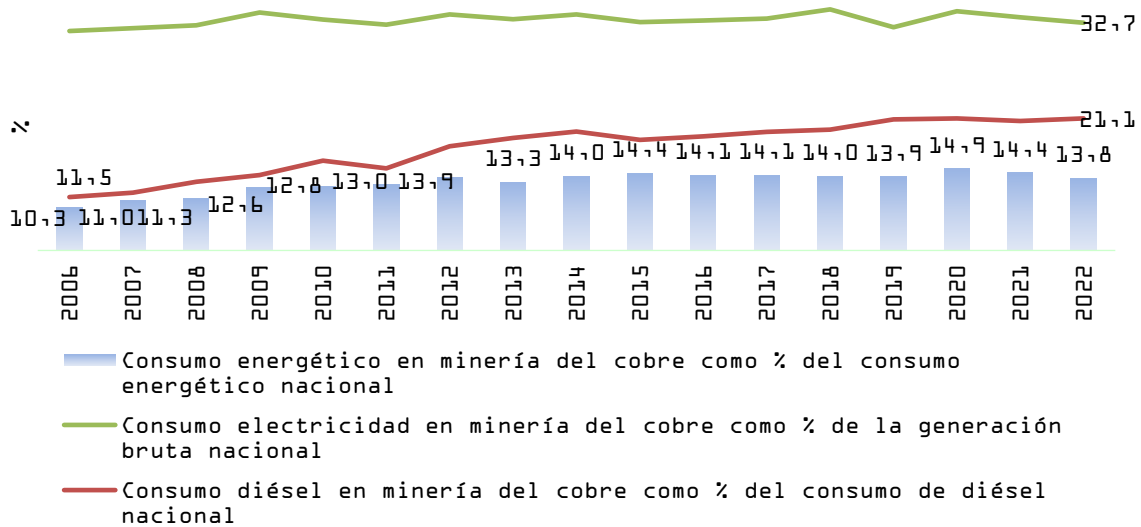


Fuente: Cochilco

4.3. 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 2022 es responsable del 13,8% 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, 2006-2022



Fuente: Cochilco en base a datos propios, Anuario Estadístico de Energía 2023 y Balance Nacional de Energía 2022 (Comisión Nacional de Energía y Ministerio de Energía, 2023)

Desagregando los datos, vemos que en el mismo periodo el consumo de electricidad se ha mantenido relativamente estable llegando a un 32,7% del total nacional en el 2022, 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 2022.

4.4. Consumos por región

Como se aprecia en la Tabla 2, Antofagasta (II) es por lejos la región con mayor consumo energético tanto en combustibles (59,4 mil TJ, equivalente al 62,6% del total de combustibles durante 2023) como en electricidad (53,9 mil TJ, equivalente al 55,7% del total de electricidad). El mayor consumo energético de Antofagasta viene dado por su alta producción de cobre (56,6% 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 2023 ha habido un aumento en consumo de agua de mar en la Región

respecto al 2022 con plantas operando a su total capacidad como la Planta Desaladora Coloso.

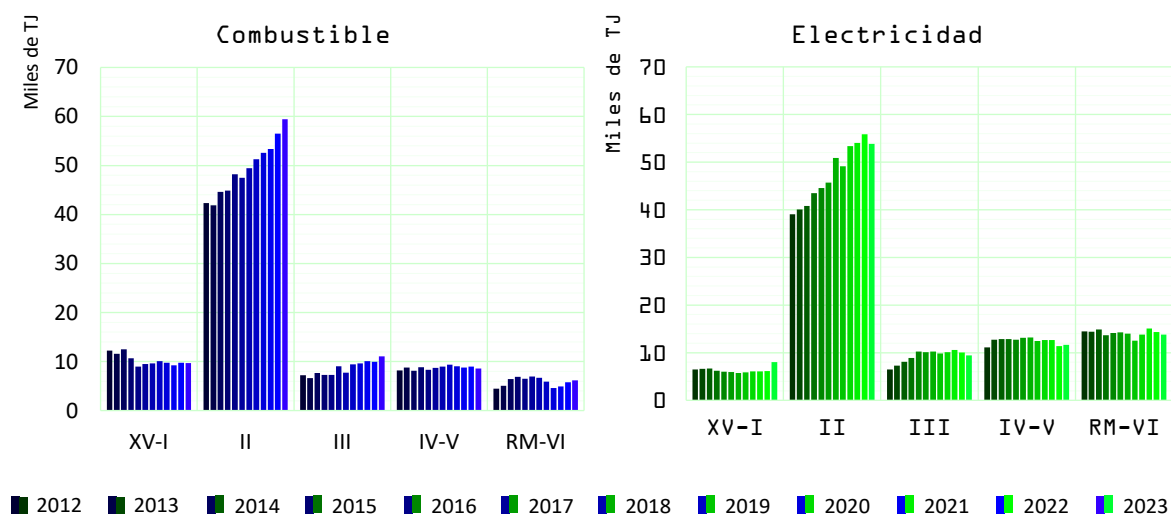
Tabla 2: Participación (%) del consumo de energía y producción de cobre por región, 2023

PARTICIPACIÓN	XV-I	II	III	IV-V	RM-VI
Consumo electricidad	8,3	55,7	9,7	12,0	14,3
Consumo combustibles	10,2	62,6	11,7	9,0	6,5
Consumo total energía	9,2	59,1	10,7	10,5	10,4
Producción cobre	12,9	56,6	8,5	11,3	10,8

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 113,3 mil TJ en 2023 (+39,1%). Atacama (III) también ha experimentado un alza e importante en el mismo periodo, pasando de 13,7 mil TJ a 20,5 mil (+49,3%). Por otra parte, las regiones de Coquimbo y Valparaíso (IV y V) tuvieron un alza de 19,3 mil TJ a 20,2 mil TJ (+4,7%), 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 (5,5%) 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 17,7 mil TJ (-5,4%).

Figura 9 Consumo de energía en la minería del cobre por región, 2012-2023

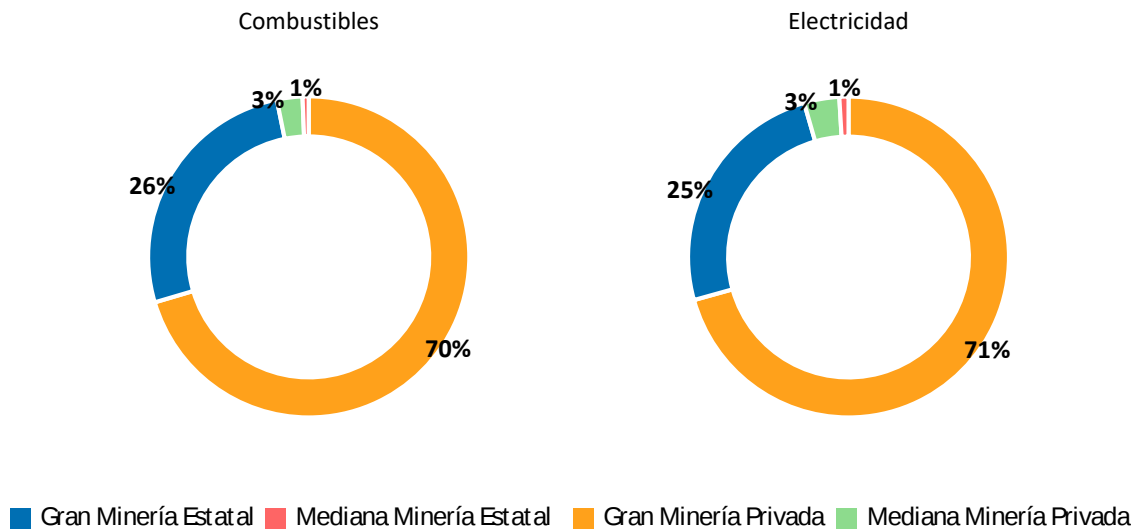


Fuente: Cochilco

4.5. Consumos por tamaño de minería

Como se aprecia en la Figura 10, la gran minería privada del cobre que produjo el 68% de la producción de cobre nacional el 2023, fue responsable de alrededor de dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante ese año. La gran minería estatal por su parte, representada por Codelco (26% de la producción nacional de cobre), concentró el 26,4% de combustibles y el 24,9% de electricidad, respectivamente. La mediana minería privada (aproximadamente 4% de la producción nacional) es responsable del 2,6% de combustibles y 3,5% de electricidad. Por último, la mediana minería estatal (alrededor del 1% de la producción nacional de cobre), representada por las plantas de Enami, consume 0,6% en combustibles y 0,9% de la electricidad.

Figura 10 Consumo de energía en la minería del cobre por tamaño, 2023



Fuente: Cochilco

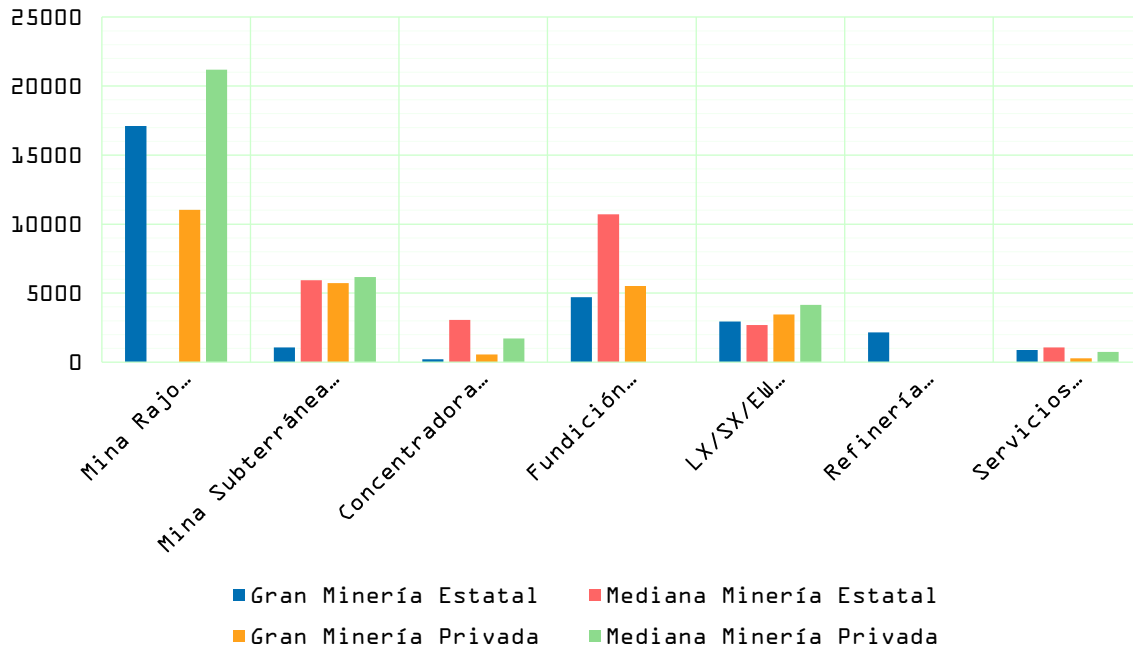
En Figura 11 es posible observar los distintos consumos unitarios de combustible por tonelada de cobre fino para cada etapa según el tamaño de minería. Es visible que en el proceso de mina rajo existen diferencias según el tamaño de la operación, de hecho, la mediana minería privada casi duplica en consumo a la gran minería, tanto estatal como privada. Los consumos de la mediana minería privada con 21.184 MJ/TMF, en el caso de Codelco el consumo llega a los 17.109 MJ/TMF y por último la gran minería privada alcanza los 11.034 MJ/TMF.

En esta notoria diferencia inciden una serie de variables inherentes al tamaño de la minería, como también a otros factores que se considerará evaluar con más detalle en futuros informes.

En particular en mediana minería privada, es complejo dilucidar patrones que expliquen el alza en el consumo unitario de mina rajo debido a la intermitencia de las respuestas entregadas a Cochilco en este segmento en los últimos cuatro años.

Por otro lado, también se puede destacar el consumo de la fundición de Enami llega a los 10.710 MJ/TMF y que duplica los consumos de Codelco (4.714 MJ/TMF) y la gran minería privada (5.522 MJ/TMF).

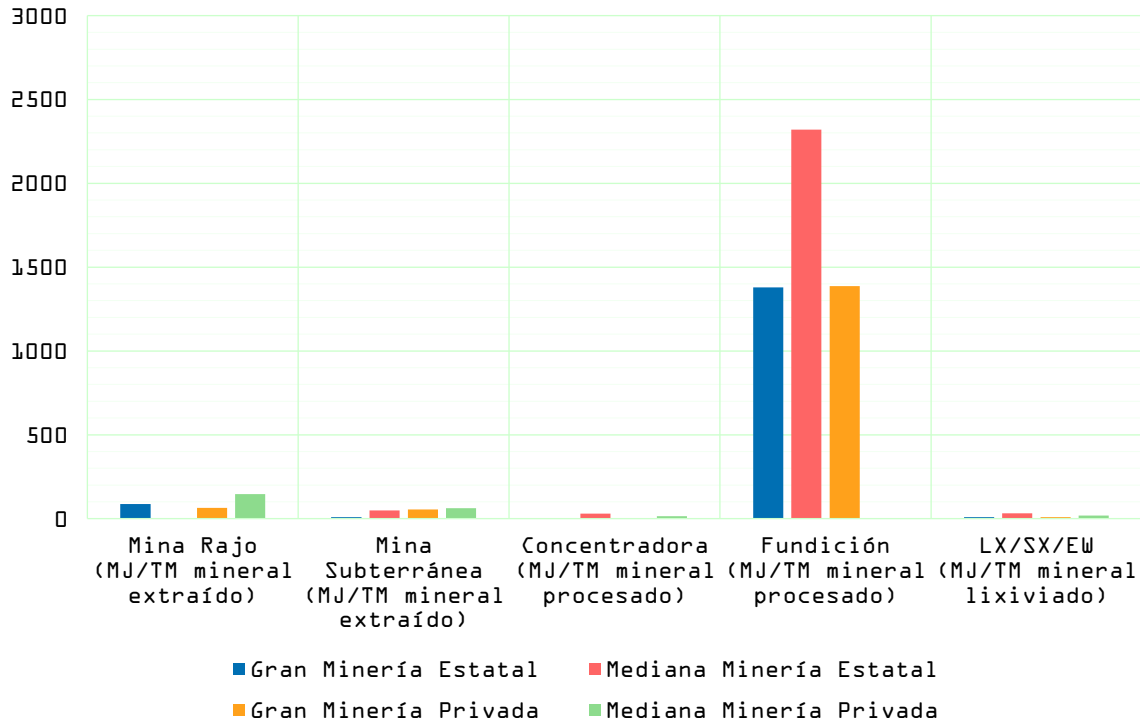
Figura 11: Consumo unitario de combustible por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa clasificado por tamaño, 2023



Fuente: Cochilco

En la Figura 12 se muestran los consumos unitarios de combustible por tonelada de mineral tratado en cada etapa según el tamaño de minería, en ella la Fundición sobresale por encima de todos los procesos, donde Enami tiene el consumo de energía más alto 2.321 MJ/TM que es equivalente a casi al doble del consumo de los 1.387 MJ/TM de la gran minería privada y de Codelco, que tiene 1.380 MJ/TM, esto se debe fundamentalmente al tipo de instalaciones que tiene la Fundición de Enami. En los demás procesos no se ven grandes diferencias según el tamaño de la operación.

Figura 12: Consumo unitario de combustible por tonelada de material procesado en cada etapa clasificado por tamaño, 2023



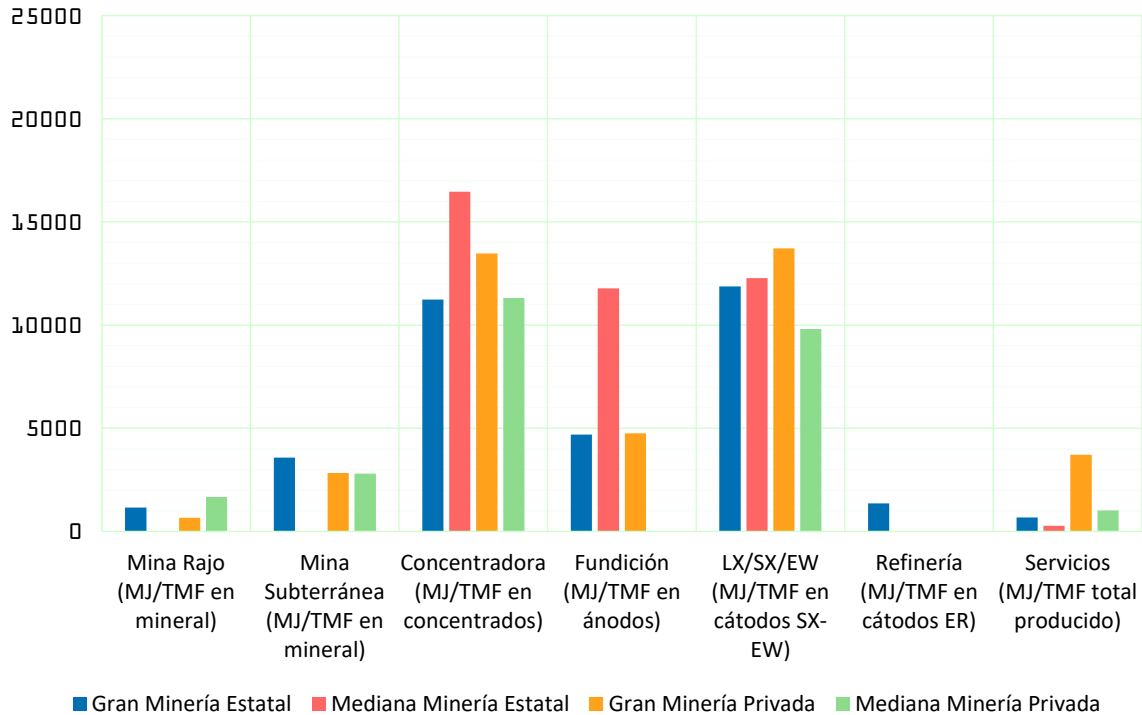
Fuente: Cochilco

En el caso de la electricidad, la Figura 13 muestra los consumos unitarios por tonelada de cobre fino para cada etapa según el tamaño de la operación. Se observa que las etapas de concentradora y LX/SX/EW tienen un consumo unitario significativamente más alto. En particular, la concentradora presenta diferencias moderadas según el tamaño, donde sobresale el consumo de Enami, seguida por la gran minería privada que conllevan un 16.459 MJ/TMF y 13.469 MJ/TMF, respectivamente. Esto se puede explicar, en parte, por las condiciones bajo las cuales trabajan las operaciones de cada tamaño sus leyes de mineral tratado, dureza del material, entre otros. La intermitencia de las respuestas en estos ítems no permite hacer un análisis detallado ni representativo por tamaño de estos factores que inciden directamente en el consumo eléctrico de la concentradora.

Por otro lado, el proceso de Fundición muestra variaciones significativas en el consumo eléctrico unitario según el tamaño. Los valores registrados por Enami (11.781 MJ/TMF) son más del doble de los observados en la Gran Minería, tanto en el sector privado (4.700 MJ/TMF) como en el estatal (4.759 MJ/TMF).

En el proceso de Lixiviación, que también es intensivo en uso de electricidad, los consumos unitarios no presentan substanciales diferencias por tamaño de operación minera.

Figura 13: Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa clasificado por tamaño, 2023¹



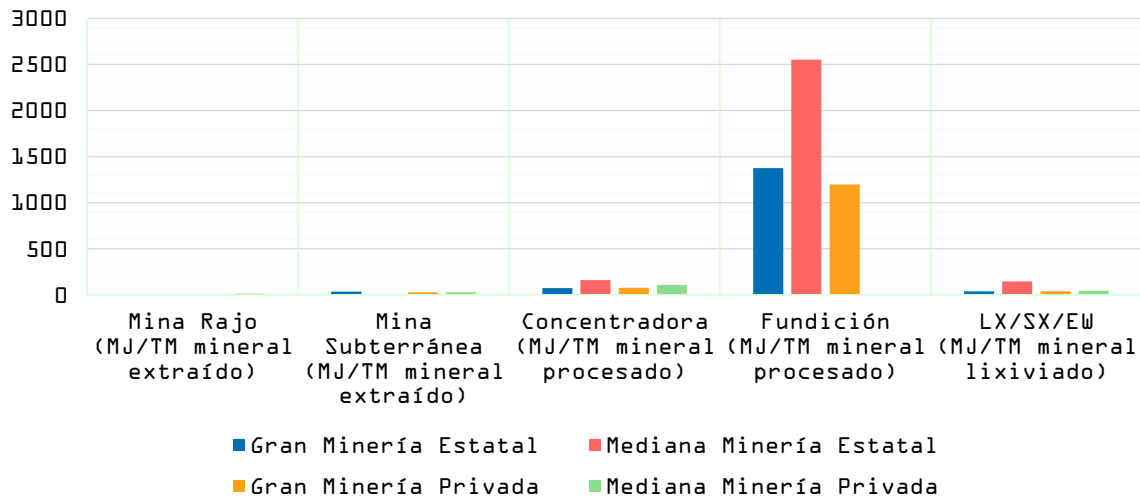
Fuente: Cochilco

La Figura 14 presenta los consumos unitarios de electricidad por tonelada de mineral tratado en cada etapa, diferenciados por el tamaño de la minería. Al igual que en el caso del consumo de combustibles, se destaca que la Fundición es el proceso con mayor consumo eléctrico unitario. En particular, Enami registra el consumo más alto con 2.533 MJ/TM, superando significativamente a Codelco con 1.376 MJ/TM. La gran minería privada, por su parte, tiene el consumo más bajo con 1.195 MJ/TM.

En los demás procesos no se ven grandes diferencias según el tamaño de la operación.

Figura 14: Consumo unitario de electricidad por tonelada de material procesado en cada etapa clasificado por tamaño, 2023

¹ No se incluye a la empresa Valle Central dentro del alcance de mediana minería privada, debido a que procesa relaves.



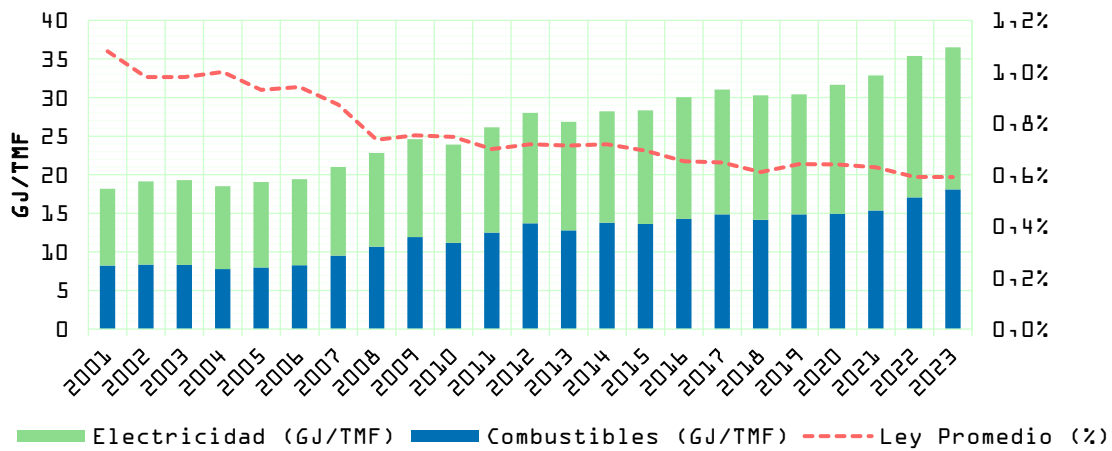
Fuente: Cochilco

4.6. Consumos totales unitarios

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 2023 se necesitaron en promedio 36,5 GJ para producir una tonelada de cobre fino, un 100,6% 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 18,1 GJ/TMF en 2023 (+101,0%), mientras que el consumo de electricidad aumentó de 10,0 GJ/TMF a 18,4 GJ/TMF (+83,7%) 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 y minería enfocada en la explotación de minerales sulfurados, debido al agotamiento de los yacimientos de minerales de óxidos.

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 15 ilustra la relación inversa entre la evolución del consumo unitario de energía y la ley promedio anual del mineral desde el 2001 al 2023.

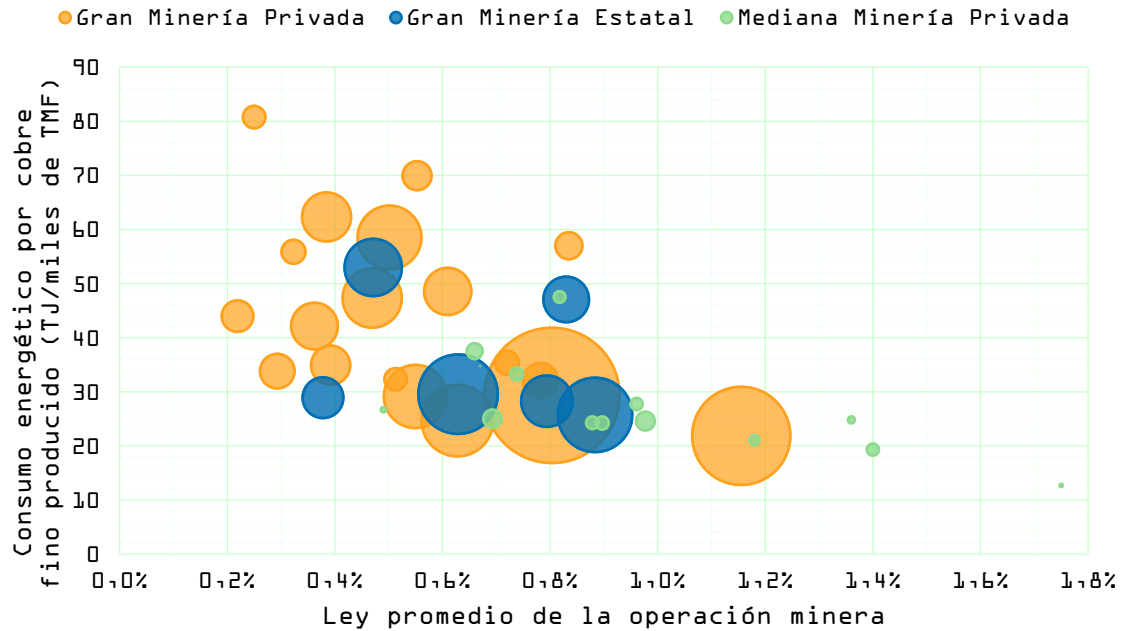
Figura 15 Evolución del consumo unitario de energía y leyes a nivel nacional, 2001-2023

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 2023, como se ilustra en la Figura 16. 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.

Es así como, en 2023, se observa que la mediana minería privada trabaja con mayores leyes comparativamente, con un promedio de ley del 0,85%; sin embargo, sus niveles de producción son menores, al mismo tiempo que operan con un bajo consumo de energía. En tanto, Codelco, con yacimientos que cuentan con una ley promedio del 0,64%, tiene en promedio consumos de energía por debajo de los 50 TJ/kTMF,; y la gran minería privada, con la menor ley, de un 0,59%, presenta un escenario en el que seis faenas tienen consumos de energía por sobre los 50 TJ/kTMF.

Figura 16 Consumo energético por cobre fino producido versus ley promedio del mineral por operación minera, 2023



Nota: Los tamaños de las circunferencias se grafican según el nivel de producción de cobre fino equivalente durante 2023

Fuente: Cochilco

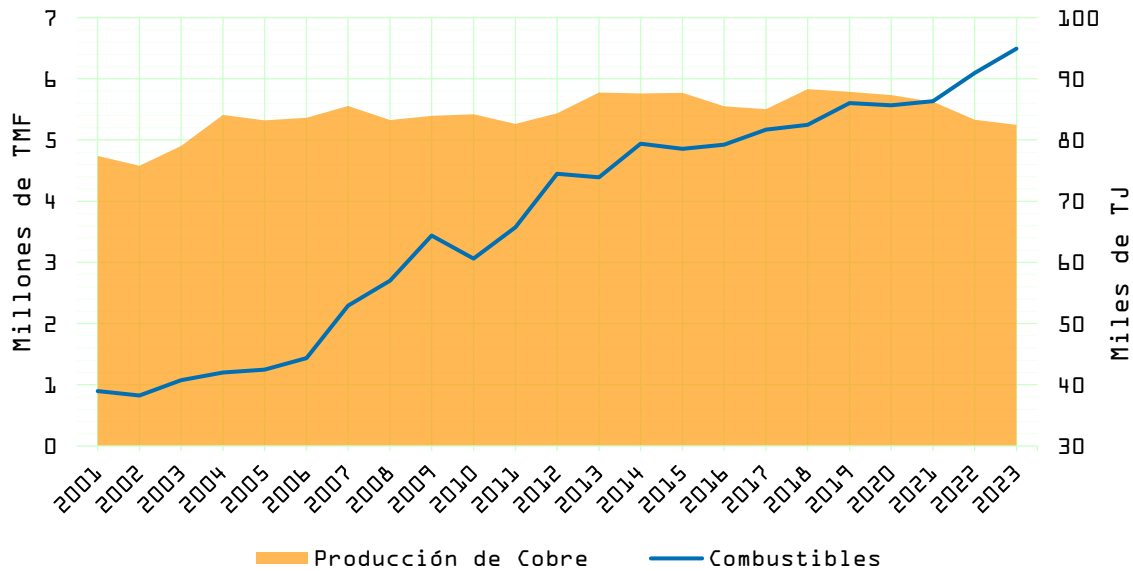
5. Consumo de combustibles

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.

5.1. Consumo agregado

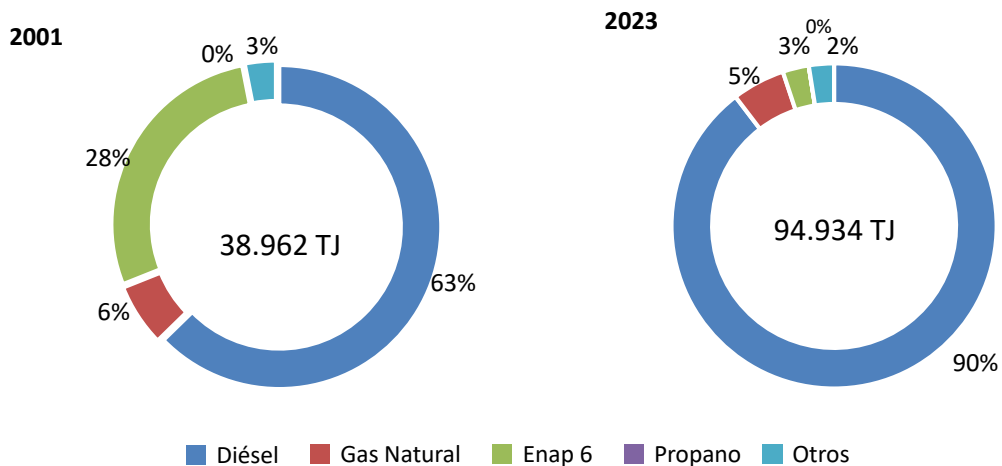
La Figura 17 presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el período 2001-2023. Durante el año 2023 alcanzó los 94.934 TJ, registrando así un aumento del 4,4% respecto al 2022, y comparado con el 2001 se registró un aumento del 143,7%.

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.

Figura 17 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 – 2023

Fuente: Cochilco

La Figura 18, presenta los cambios de la matriz de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (89,6% del total durante 2023 versus un 62,7% 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.

Figura 18 Participación de combustibles en el consumo total de combustibles, 2001 y 2023

Fuente: Cochilco

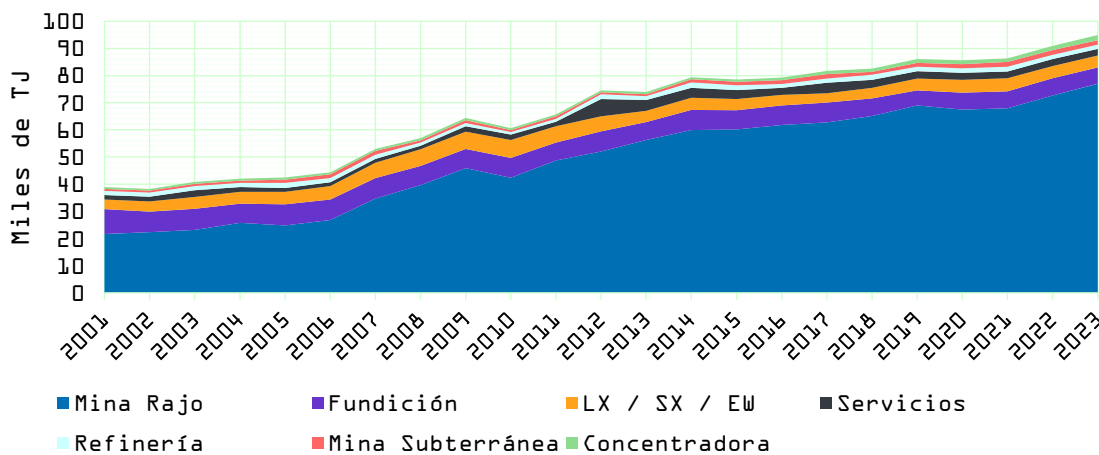
En paralelo, otros combustibles han ido perdiendo progresivamente su usabilidad, destacando el caso del Enap 6. Dicho combustible en el año 2001 representaba un 27,9% de la cartera de combustibles consumidos, pero para el año 2023 solo representó un 2,6% del total sectorial. Lo anterior se debe en gran 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.

5.2. Consumo por procesos

Como se observa en Figura 19, el proceso que mayor combustible demanda es la mina rajo (81,1% 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 76.965 TJ en 2023.

Figura 19 Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2023



Fuente: Cochilco

El incremento del 10,8 % de la producción de cobre entre 2001-2023 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 extraer, e particular en mina rajo el mineral extraído y a transportar ha aumentado un 129% en el período analizado, 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.

Mirando en detalle el combustible usado en mina rajo, el mayor combustible usado es el diésel, que en el 2023 conlleva 75.319 TJ lo que representó el 97,9% del consumo energético en ese proceso. A su vez, el diésel usado en mina rajo representó el 88,5% del diésel total consumido en los distintos procesos mineros y el 79,3% de los combustibles usados en minería del cobre el 2023.

La segunda fuente más importante de demanda de combustibles en el 2023 es el proceso de Fundición que representa un 6,3% del total de combustibles usados en minería ese año. Al ver entre 2001 al 2023 este proceso disminuyó en un 53,1% su consumo de combustible

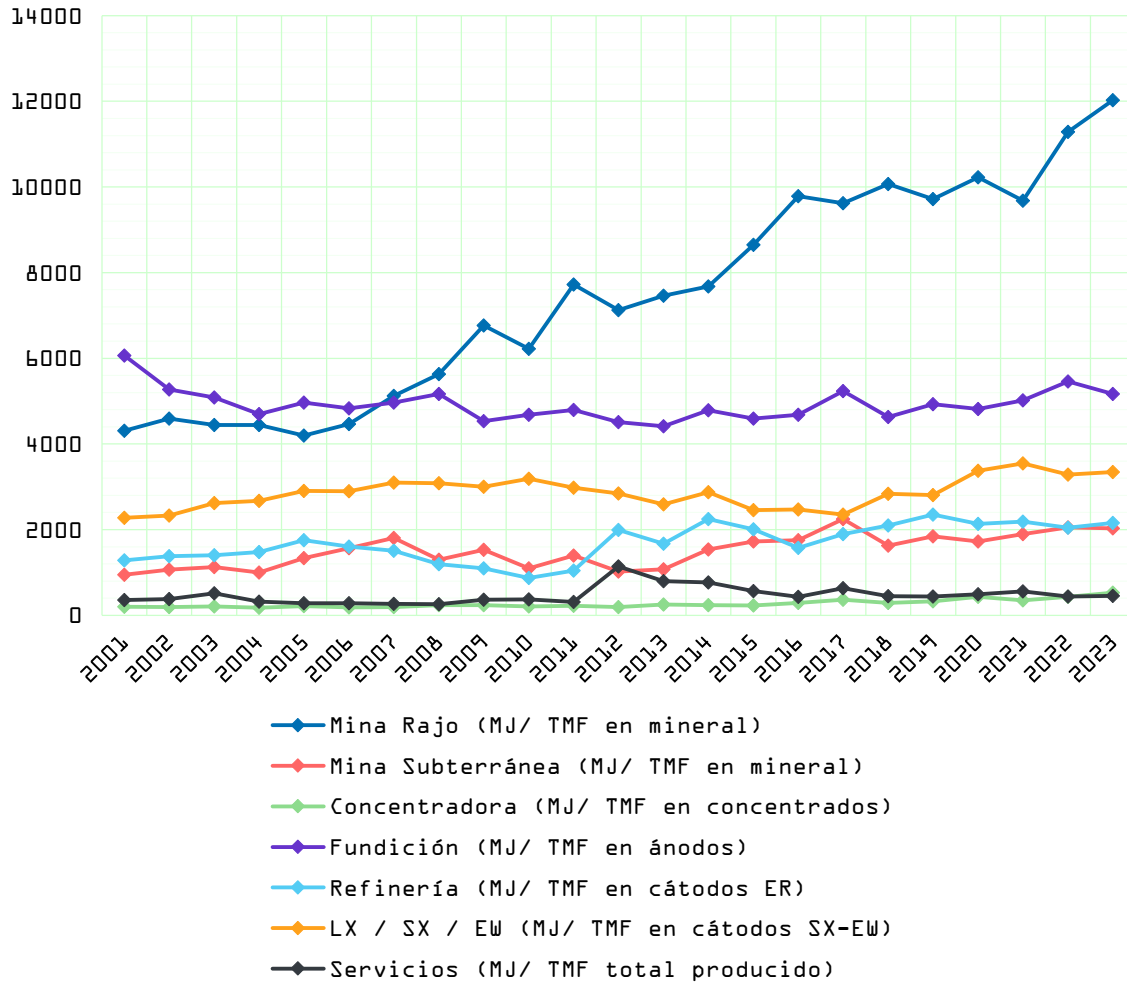
entre el 2001 al 2023 ya que su nivel de procesamiento se redujo en un 28,6% y al cierre de fundiciones como es Ventanas.

Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha incrementado en menor medida que mina rajo en el período analizado con cifras por debajo de los 1.300 TJ, y se han mantenido con participaciones anuales entre el 2 y 4 %.

5.3. Consumos unitarios

Por otra parte, la Figura 20 ilustra los consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa. Se destaca el proceso de mina rajo, proceso ha crecido en prácticamente todos los años, pasando de 4.308 MJ/TMF en 2001 a 12.023 en 2023 (+179,1%), 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 5.167 MJ/TMF (-14,8%) entre 2001-2023.

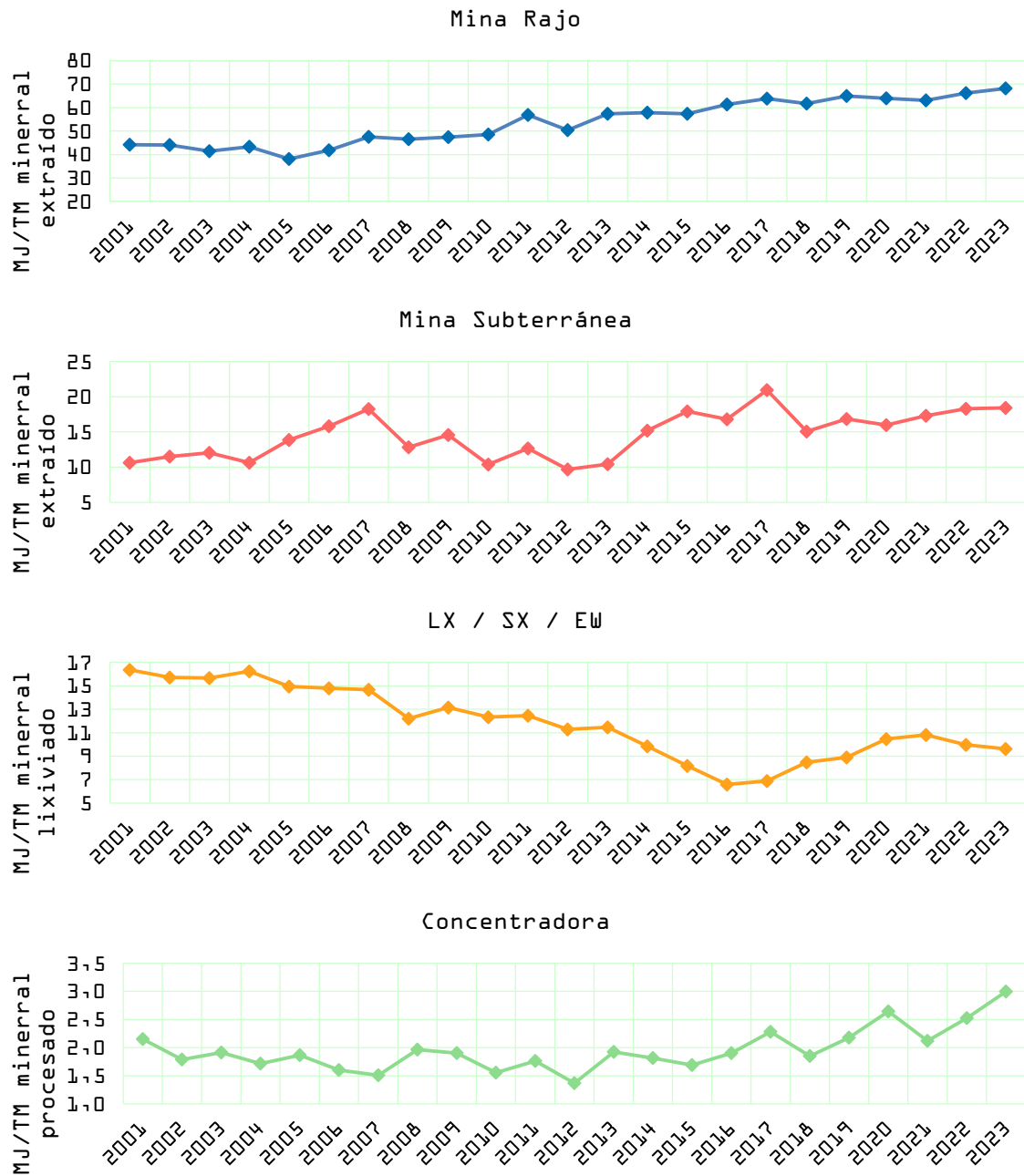
Figura 20 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa (MJ/TMF), 2001-2023

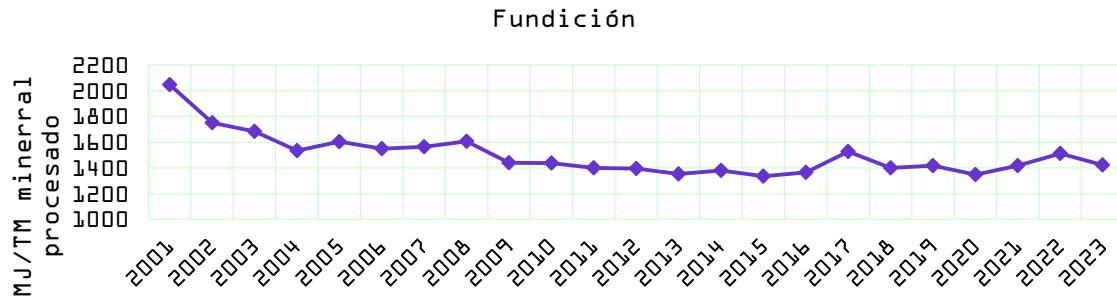


Fuente: Cochilco

Al analizar el uso de combustible en la mina rajo respecto del mineral extraído (Figura 21), el promedio ponderado país se incrementa en 54,1% entre el 2001 al 2023 de 44,2 MJ a 68,1 MJ por tonelada de mineral extraído.

Figura 21 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de material procesado, 2001-2023





Esto se debe, por una parte, Fuente: Cochilco e 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, les ha pasado 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.

En Figura 21 también destaca 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 2023 del 30,5%, de 2.046 a 1.422 MJ/TM concentrado procesado.

Por otro lado en el proceso de Lixiviación ha disminuido de 16 a 10 MJ/ TM mineral lixiviado (-41,2%), ello se debe a un importante aumento del 113% del mineral procesado para la producción de cátodos entre el 2001 y el 2023, en comparación al consumo de combustibles que se incrementó un 25% en este proceso.

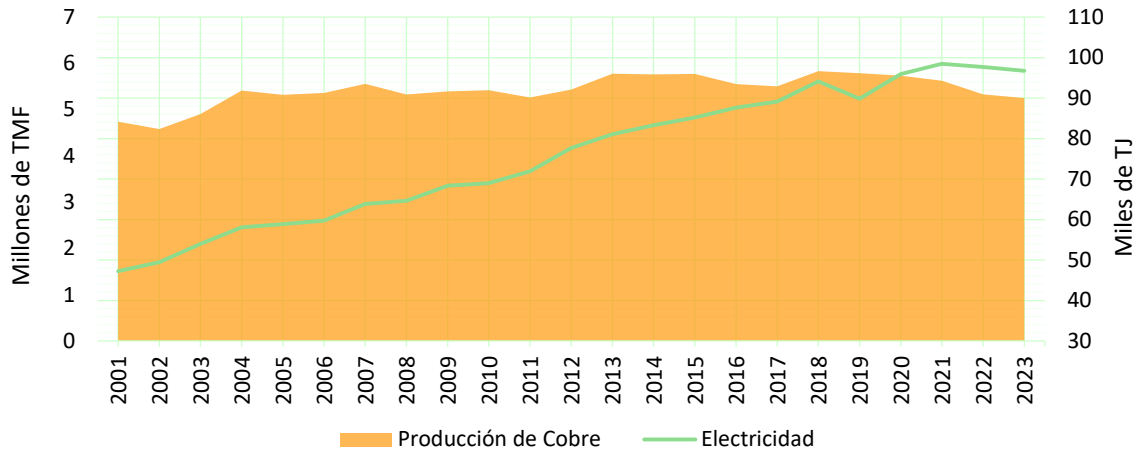
6. Consumo eléctrico

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.

6.1. Consumo agregado

El año 2023 la minería del cobre consumió un total de 96.744 TJ en energía eléctrica, presentando una leve disminución del 1,0 % respecto al 2022 y comparado con el 2001 se registró un aumento del 104,7% como se puede observar en la Figura 22.

Figura 22 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001-2023



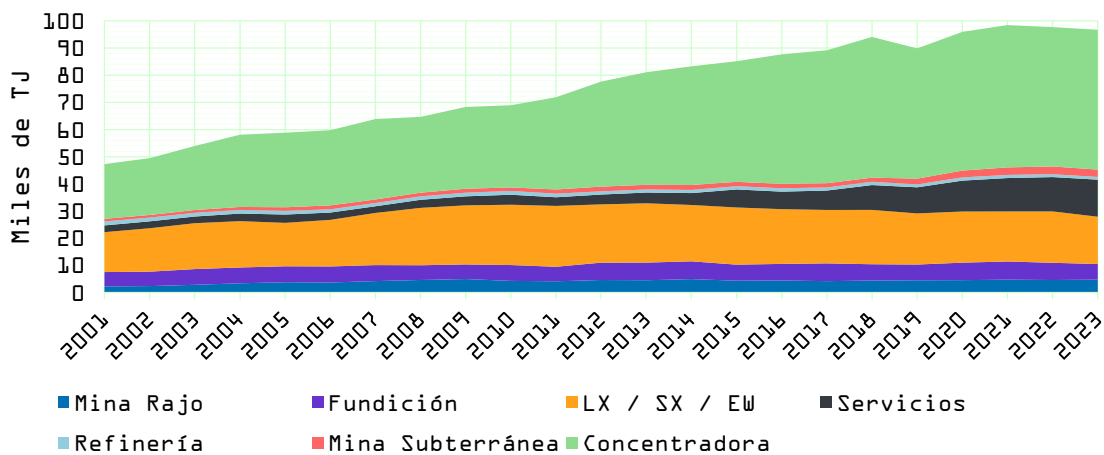
Fuente: Cochilco

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.

6.2. Consumo por procesos

Como se puede ver en la Figura 23, 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 51.489 TJ (55,2% del total) en 2023. Es importante señalar también que desde el año 2014 Servicios abarca también los procesos de desalación e impulsión de agua de mar como se verá más adelante desglosado en la Figura 25.

Figura 23 Evolución en el consumo de electricidad por proceso, 2001 – 2023

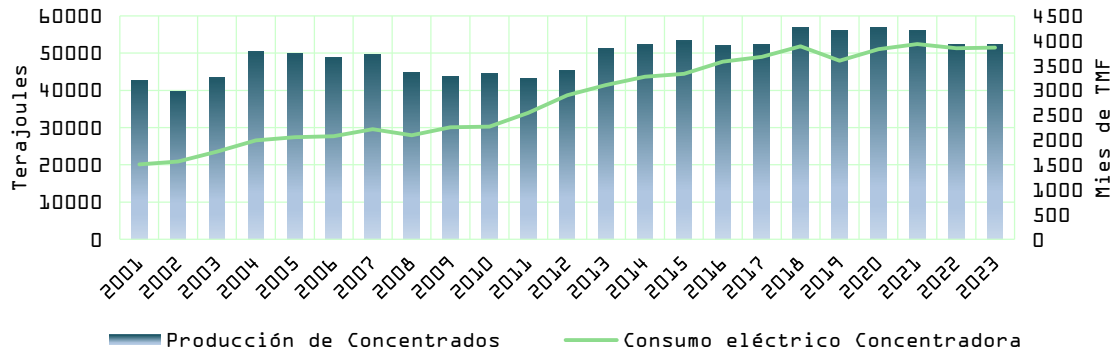


Fuente: Cochilco

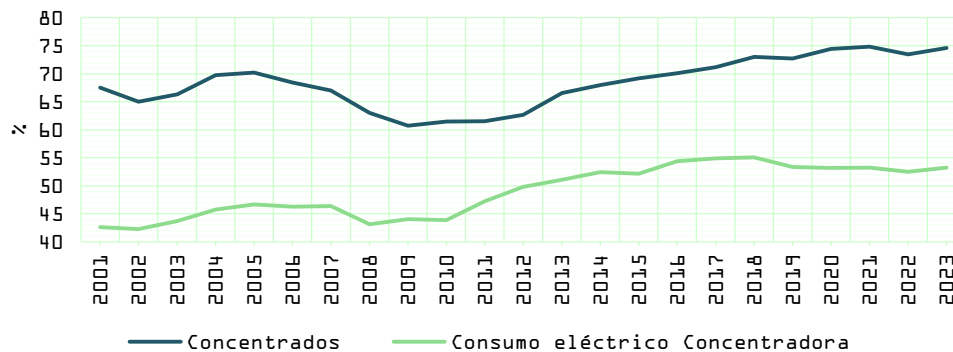
Por otra parte, el consumo eléctrico en lixiviación, la segunda mayor fuente de consumo eléctrico, si bien ha aumentado su consumo eléctricos en términos absolutos de 14.679 TJ en 2001 a 17.405 TJ en 2023, decreció en su participación desde el 31,0% al 18,0% en igual período.

En Figura 24 se puede observar el aumento en un 22,3% en la producción de concentrados entre el 2001-2023 pasando del 67,5% de la producción cuprífera nacional al 74,6% en el mismo periodo, lo cual incide directamente en un mayor consumo de electricidad señalado anteriormente.

Figura 24 Producción de concentrados y consumo eléctrico en Concentradora en la minería del cobre, 2001 – 2023



Concentrados y consumo eléctrico en Concentradora como proporción de la producción total y del consumo eléctrico total respectivamente

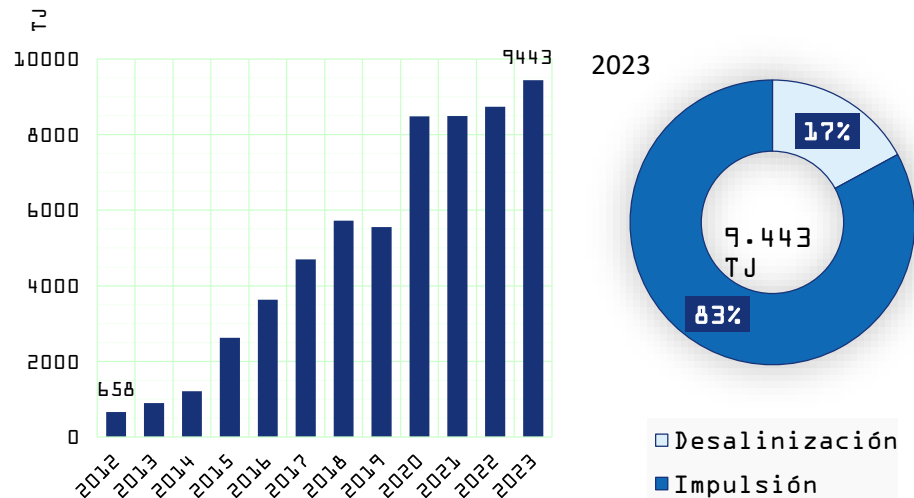


Fuente: Cochilco

El otro proceso que ha ido intensificando su demanda de electricidad es la 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 el de la desalación e impulsión de agua de mar a las faenas mineras y que en el año 2023 fue de un total de 6.812 lts/s con algunas de las plantas ahora operando a su total capacidad como Planta Coloso de Escondida y otras nuevas plantas que comienzan ya suplir a Quebrada Blanca y Pelambres. En efecto, como se advierte en la Figura 25, este crecimiento del consumo de energía eléctrica para impulsión y desalación de agua en la minería del cobre prácticamente se ha multiplicado 14,4 veces en los últimos 11 años, desde 658 TJ en 2012 a 9.443 TJ en 2023, lo que equivale al 69,2% del consumo eléctrico en Servicios y al 9,8 % del consumo eléctrico total de la minería en 2023. De estos

9.443 TJ el mayor consumo eléctrico viene dado por la impulsión con 7.828 TJ, que representa el 82,9% (Ver Figura 25).

Figura 25 Consumo eléctrico (TJ) desalinización e impulsión de agua de mar, 2012-2023

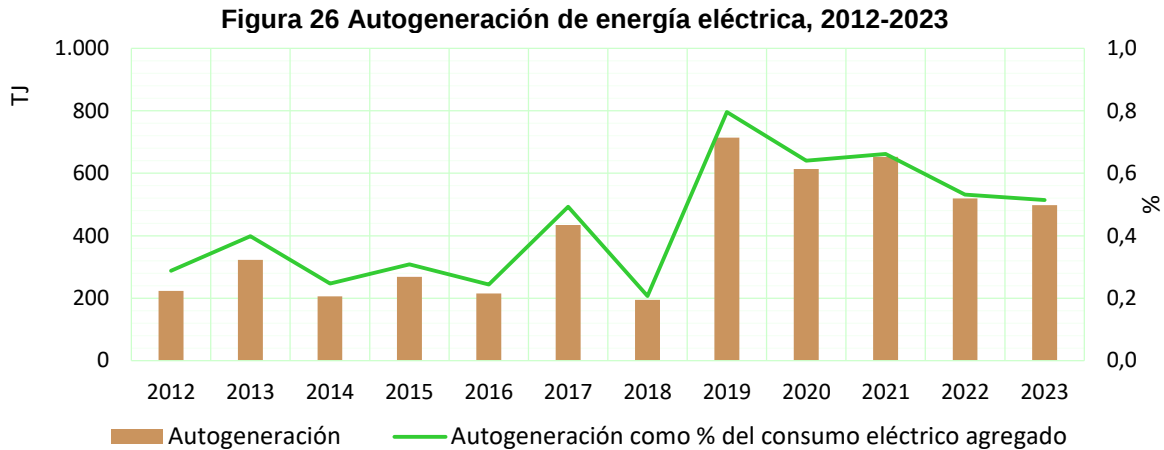


Fuente: Cochilco

Este crecimiento en uso de agua de mar 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.

6.3. 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 re-aprovechamiento 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 que en el 2023 representó el 9,6% de su consumo eléctrico ese año. Con todo, como se aprecia en la Figura 26, se estima que la autogeneración alcanzó en 2023 los 498 TJ, equivalentes al 0,5% del consumo eléctrico total en la minería del cobre. Desde el 2012 la autogeneración de electricidad ha ido creciendo y al 2023 se ha duplicado.



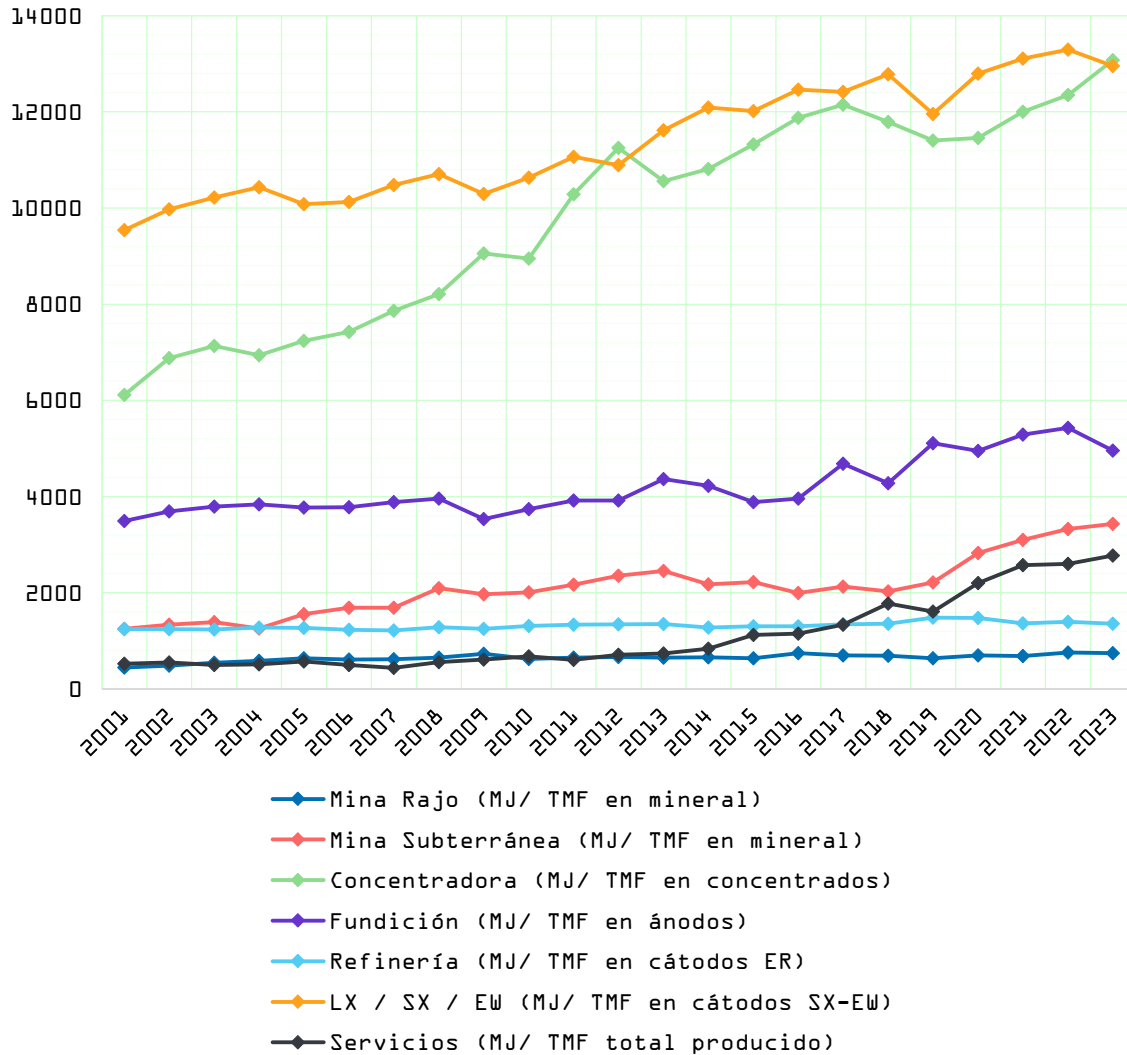
Fuente: Cochilco

6.4. Consumos unitarios

La Figura 27 presenta los consumos unitarios de electricidad por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa. 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 13.073 TJ/cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 113,9% en el periodo 2001 – 2023. 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 hace que se necesite más electricidad que antes para este subproceso.

Otro proceso que ha experimentado alzas constantes en su consumo unitario de electricidad ha sido el de LX-SX-EW, de 9.542 a 12.956 TJ/ cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 35,8 % desde el 2001. El proceso Servicios se ha cuatriplicado, este aumento se debe principalmente al uso de plantas desalinizadoras e impulsión del agua de mar (directa o desalinizada) Ver Figura 27,

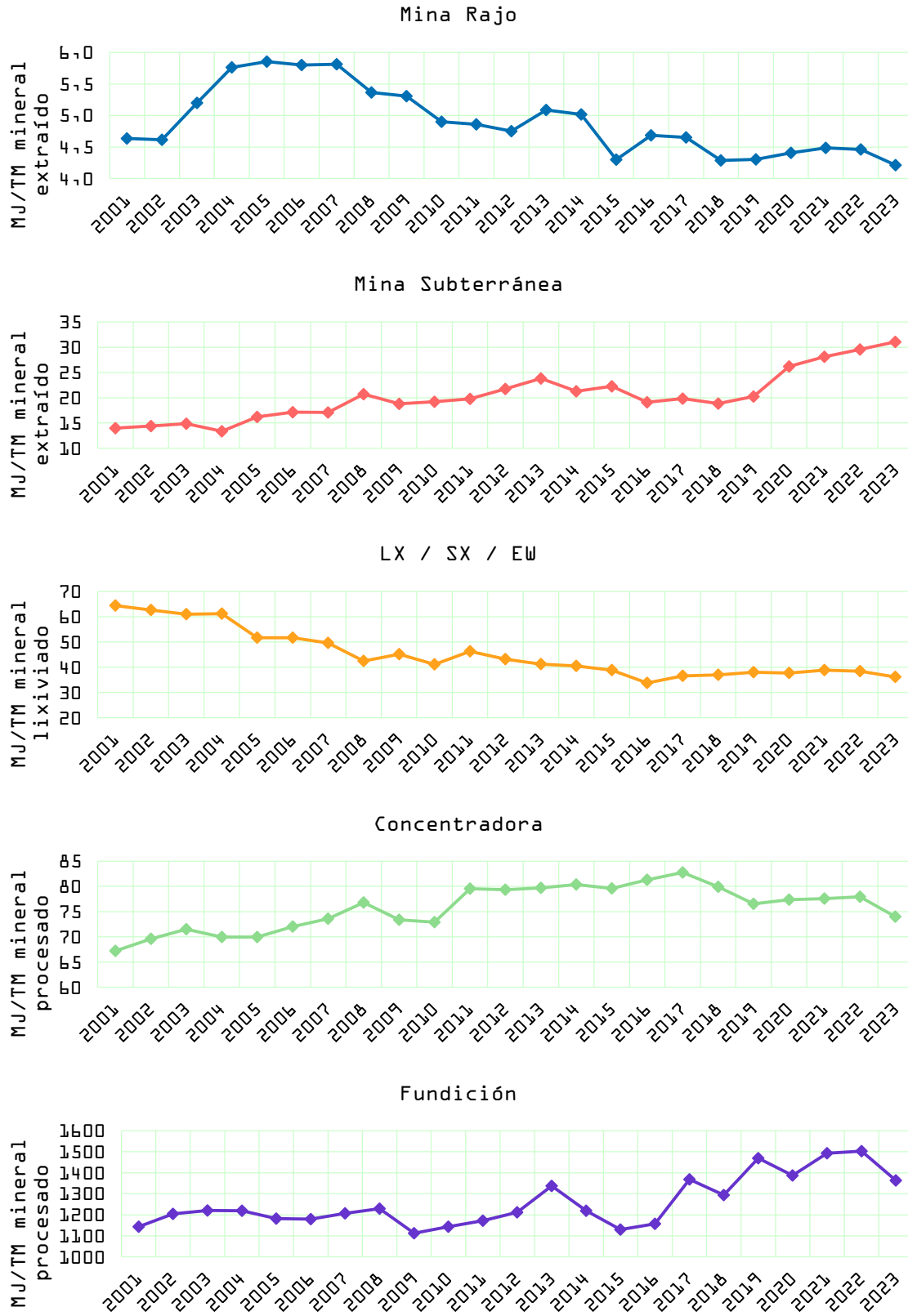
Figura 27 Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa (MJ/TMF), 2001-2023



Fuente: Cochilco

En tanto Fundición creció un 41,8 % 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 28 Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral extraído/procesado (MJ/TM), 2001-2023



Fuente: Cochilco

Fuente: Cochilco

Al ver en Figura 28 el proceso de concentración en su consumo de electricidad por tonelada de mineral procesado en los últimos 20 años, este se ha mantenido estable, con incrementos en la mayoría de los años, aunque con mayor moderación que en su consumo unitario por cobre fino contenido, acumulando al 2023 un alza de 10,0%, teniendo en la primera década del 2000 un promedio de 71,7 MJ/T Concentrado Procesado y en la última década de 78,8 MJ/T Concentrado Procesado. Otro proceso que ha crecido entre el 2001 al 2023 es la mina subterránea en un 122,2% llegando a 31,1 MJ/Tonelada de mineral extraído, este consumo unitario de electricidad es por lo menos 7 veces más que el de 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 43,9 % en el período 2001-2023 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 2023, se incrementó el consumo de energía eléctrica y sus consumos unitarios en la mina subterránea como se observa en Figuras 27 y 28 en los últimos tres 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 como en el largo plazo podría llegar 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 refinерías 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.

6.5. Integración de energías renovables en el 2023

Un resultado concreto de la transformación energética que Chile ha decidido realizar se observa en el importante aumento de la generación renovable en la matriz energética chilena en los últimos años, llegando a un 55,6 % de generación renovable en 2022. El mayor aumento lo han tenido las tecnologías solar fotovoltaicas y eólica, que han

aumentado drásticamente pasando en conjunto de un 0,8% en 2013 a un 28% en 2022² (ACERA, 2023).

Es así como en la última década, el país ha avanzado en mejoras significativas para un escenario energético 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; no obstante estos importantes avances que ha tenido Chile, cabe señalar que el abrupto ingreso de las energías renovables no convencionales y el comparativamente lento crecimiento en líneas de transmisión, actualmente se evidencian importantes desafíos país para lograr la total integración.

En este contexto, la minería del cobre ha realizado esfuerzos por usar 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, con el objetivo de iniciar contratos con energías renovables y con precios más convenientes.

Ello se puede evidenciar en Tabla 3, que muestra los avances en la integración de renovables en minería del cobre, con la totalidad de las operaciones de la mediana minería estatal Enami, ya tiene en el 2023 suministro eléctrico con energías renovables en un 100%, le sigue la gran minería del cobre en que la mayoría de sus operaciones (90%) ya cuentan con suministro renovable, y este representa el 93% de su consumo eléctrico, en tanto un 56% de las operaciones de la mediana minería tienen ya integrado un suministro renovable que representa un 57% del consumo eléctrico de ese segmento, Codelco tiene una de sus operaciones con contrato de suministro renovable y este suministro representa el 22% de su consumo eléctrico total. Es así como la minería del cobre chilena tiene un 65% de sus operaciones con contratos con energías renovables que suministran el 74% de la demanda eléctrica total del sector minero.

Tabla 3: Suministro de energías renovables por tamaño de operación minera del cobre en el 2023

TIPO DE MINERÍA	NÚMERO DE OPERACIONES	CONSUMO ELECTRICIDAD (TJ)	PPA SUMINISTRO DE ER	PPA CON SUMINISTRO ER REGISTRADO EN RENOVA	ELECTRICIDAD SUMINISTRADA CON ER (TJ)	PORCENTAJE DEL CONSUMO SUMINISTRADO CON ER
Gran Minería Estatal	8	24.045	1	0	5.400	22%
Mediana Minería Estatal	6	889	6	5	889	100%

² <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

Gran Minería Privada	21	68.376	19	17	63.759	93%
Mediana Minería Privada	17	3.434	8	7	1.974	57%
TOTAL	52	96.744	34	29	72.022	74%

Fuente: Cochilco en base a datos EMPAE 2024

Ahora bien, hoy en día dada la estructura de nuestro sistema eléctrico es bastante complejo identificar o correlacionar una unidad de generación de la matriz energética con el consumidor final (en este caso la minería) y pueden haber por ejemplo eventuales restricciones en la transmisión, cuando se producen congestiones en la transmisión. Por tanto estos contratos que el proveedor ofrece de energías renovables debieran ser certificados y o trazados.

Es así como el Coordinador Eléctrico Nacional, apoyado por el Ministerio de Energía, está implementando RENOVA³, un sistema de trazabilidad para acreditar que los contratos de suministro eléctrico basados en energías renovables que cumplen con esta condición y a la vez reconocer el atributo cero emisión de la electricidad generada de fuentes renovables. Para evitar conflictos de doble contabilidad, RENOVA generó una metodología para determinar también un factor de emisión residual de la red eléctrica basado en el Greenhouse Gas Protocol (GHG) Protocol.

Si comparamos con el año pasado, en el que 23 operaciones mineras declararon tener sus PPAs renovables registrados en RENOVA, en el 2023 esta cifra aumentó a 29 contratos registrados, lo cual muestra que el 56% de la minería del cobre cuenta con certificación de suministro renovable, desglosando por tamaño la gran minería tiene un 81% de estos PPAs registrados en RENOVA, le sigue la mediana minería privada con el 41% de sus contratos también registrados en este sistema. En minería estatal, la mediana minería tiene cinco operaciones con registro RENOVA y Codelco aún no está con registro RENOVA en el año 2023.

En síntesis se ven los avances de la integración de las energías renovables en minería del cobre al año 2023, hecho que le permite reducir sus emisiones GEI en las operaciones mineras, pudiendo así dar cumplimiento a los compromisos públicos que ha realizado el sector como lograr una carbono neutralidad en un futuro cercano.

6.6. Eficiencia Energética

La Eficiencia energética en Chile es considerado uno de los factores relevantes, para la carbono neutralidad que el país se comprometió alcanzar al 2050. En febrero de 2021, se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.305 sobre Eficiencia Energética que promueve el uso racional y eficiente de la energía, conjuntamente con institucionalizar la eficiencia energética y promover la activa gestión energética de grandes consumidores entre otras materias. El 2022 entró en vigencia el Reglamento sobre Gestión Energética de los organismos públicos y de los grandes consumidores de energía (empresas con consumos

³ <https://www.coordinador.cl/renova/>

de energía para uso final sobre 50 tera-calorías (58 GWh) anuales, que se denominan consumidores con capacidad de gestión de energía (CCGE)⁴.

Las empresas que califiquen como CCGE están obligadas a implementar uno o más sistemas de gestión de energía (SGE) que cubran, al menos, un 80% de su consumo energético total, e incluyan políticas, metas, planes de acción e indicadores de desempeño energético, designar un gestor energético y tener sistemas de medición y verificación. Estos sistemas de gestión serán controlados mediante auditorías que deberán ser contratadas cada tres años por las empresas calificadas como CCGE, las que además deberán enviar anualmente a la autoridad un informe de sus consumos de energía e información sobre las oportunidades y acciones de eficiencia energética realizadas y proyectadas. Por otro lado, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles será la encargada de la fiscalización de esta Ley.

6.6.1. Eficiencia energética en el 2023

Dado que el sector minero del cobre es un importante consumidor energético y el contexto actual nacional con la Ley de Eficiencia Energética, este año Cochilco decidió integrar nuevas preguntas en encuesta EMPAE en relación a si empresas mineras calificaban como CCGE y si así fuera respecto a sus avances en implementación de lo requerido en la Ley como por ejemplo tener un SGE.

Esta información suministrada por las empresas mineras encuestadas se puede ver en Tabla 4, muestra que en el año 2023 la totalidad de las operaciones de la gran minería del cobre y Codelco califican como CCGE, en tanto en mediana minería, en Enami solo 1 operación no califica y de a mediana minería privada solo 3 operaciones no califican como CCGE. Es así como se puede decir que el 92% del sector minero del cobre está afecto a la Ley de eficiencia energética y califica como CCGE.

Tabla 4: Eficiencia Energética por tamaño de operación minera del cobre al 2023

TIPO DE MINERÍA	OPERACIONES AFECTA A LEY DE EE	OPERACIONES CON SGE IMPLMENTADO	OPERACIONES QUE IDENTIFICAN BRECHAS PARA TENER UN SGE	OPERACIONES CON PLANES DE ELECTROMOVILIDAD Y/O TRANSPORTE BAJO EN EMISIONES
Gran Minería Estatal	8	8	5	6
Mediana Minería Estatal	6	5	5	3
Gran Minería Privada	21	19	18	18
Mediana Minería Privada	14	11	13	10
TOTAL	49	43	41	37
PORCENTAJE (%)	94%	83%	79%	71%

Fuente: Cochilco en base a datos EMPAE 2024

⁴ Listado CCGE disponible en

<https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2024/08/05/43917/01/2527445.pdf>

Si bien la totalidad de las empresas en Chile que calificaron como CCGE, tienen un plazo de 12 meses entre 2023 al 2024 para implementar su SGE, en Tabla 4 se muestra que ya en el año 2023 el 79% de las operaciones de la mediana minería tiene su SGE ya implementado, en tanto Codelco un 100% de sus operaciones, la gran minería un 90% y Enami el 83% de sus operaciones con un SGE implementado. Es así como el 83% del sector minero de cobre afirma que ya tiene SGE implementado al año 2023, adelantándose así a lo exigido por la Ley. Ahora bien, un 79% de las empresas mineras identifican brechas para tener su SGE totalmente implementado. Comparado con el 2022 también se ven los avances en la materia, por cuanto el año pasado 38 operaciones tenían SGE implementado y en el 2023, 43 operaciones.

Otro punto importante impulsado por la Ley de eficiencia energética es la electromovilidad. Al respecto en Tabla 4 se puede observar que la electromovilidad en el sector minero del cobre ya ha empezado a implementarse en transporte liviano como iniciativa para reemplazar combustible, ejemplos de ello son el uso de taxis y buses eléctricos para el traslado de trabajadores y de equipos en zonas de operación. El 95% de las operaciones de la gran minería del cobre ya tiene planes de electromovilidad y/o transporte bajo en emisiones y en Codelco el 75% de sus operaciones, en tanto en mediana minería, el 71% de sus operaciones cuentan con avances en la materia y Enami cuenta con un 50% de sus operaciones cuenta con planes de electromovilidad implementados.

Lo anterior es evidencia de la introducción de medidas para avanzar en la descarbonización de la energía utilizada en faenas mineras y corresponde al fruto de los esfuerzos e inversiones que se han realizado en distintas áreas en esta materia. Sin embargo estas medidas han sido posible materializarlas principalmente en transporte liviano a la fecha y aún corresponden a medidas secundarias que no se enfocan en el origen central del consumo de combustibles, el cual es el diésel utilizado para operar los camiones mineros.

7. 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 es 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 y el 2023 la producción nacional de cobre se ha incrementado un 11%. En tanto el consumo energético de la minería, ha aumentado un 122%. Desglosando por tipo de energía el consumo eléctrico ha aumentado un 105% y el de combustibles un 144%, en el período 2001-2023.

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 ha aumentado más que el triple entre 2001 al 2023, llegando a representar en el 2023 el 81% 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 2023 representa el 10% 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 (22% de crecimiento concentrados versus 13% de decrecimiento en cátodos SX-EW en el periodo 2001-2023), 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 2023 representa el 52% 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.

Los datos sobre el consumo de energía han permitido al Estado evaluar y definir dónde enfocar los esfuerzos y establecer prioridades, lo que ha facilitado el ajuste de políticas orientadas al cumplimiento de los objetivos de carbono neutralidad. A futuro, la implementación de un sistema de monitoreo energético que mida anualmente el avance en eficiencia energética y la disminución del uso de fuentes fósiles será fundamental para apoyar esta labor.

Chile ha avanzado con mejoras significativas para un escenario energético más sustentable y que asegure el suministro energético aprovechando el gran potencial del país

en energías renovables, aun cuando hay muchos desafíos país que subsanar para lograr una total incorporación de energías limpias a la matriz energética del país.

Con todo, se visualiza a la industria minera del cobre como actor clave en fomentar la incorporación de energías renovables sin emisiones en la matriz energética; que ha mostrado acciones concretas de estar comprometido con uso de energías limpias y sustentables. Es así como en los últimos años, un importante número de empresas mineras ha realizado procesos de renegociación de contratos eléctricos por contratos con suministro de energías renovables. Al año 2023 un 74% de la demanda eléctrica minera proviene de fuentes limpias, lo que equivale a un 7% más que en el año 2022. Este importante aumento es señal de la velocidad con la que se han adoptado las energías renovables en el sector minero, no obstante, esto debe ir de la mano con esfuerzos constantes y continuos del país para mejorar la infraestructura de transmisión y almacenamiento de energía, promoviendo así la expansión y modernización de la red en regiones mineras, priorizando aquellas con alta demanda energética y un potencial significativo para la adopción de energías limpias.

Otro aspecto importante en este camino a la transición energética y desarrollo sustentable del sector minero es el mejoramiento continuo de la eficiencia energética. Hoy el país cuenta con la Ley de Eficiencia Energética, que mandata a los principales consumidores de energía en el país, entre los cuales está el sector minero, a realizar una gestión activa del consumo de energía, implementar sistemas de gestión de energía y reportar sus parámetros energéticos anualmente para su debida fiscalización, con esto se busca promover mejoras continuas y reducción de emisiones. .

Al respecto, la industria minera ha realizado esfuerzos y logrado avances en la materia. En el 2023, el 94% del sector minero del cobre está afecto a la Ley de eficiencia energética, el 83% de las operaciones mineras de cobre ya tienen sus sistemas de gestión de energía implementados, adelantándose así a lo exigido por la Ley. Sin embargo, un 79% de las empresas mineras identifican brechas para tener su sistema de gestión energético totalmente implementado. 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 avanzado en esta senda, y desarrollar esta línea de trabajo en las faenas donde no se ha implementado 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 así el negocio minero en su conjunto., principalmente para apoyar a aquellas empresas mineras que aún presentan brechas en la implementación de los SGE en particular la mediana minería. Para lograr lo anterior, es necesario la generación de capital humano que aborde especialmente estas temáticas , para ello se necesita capacitación y asistencia técnica destinados a la implementación total de estos sistemas, promoviendo la transferencia de mejores prácticas dentro del sector minero.

La Ley de eficiencia energética también ha impulsado la electromovilidad. La implementación de la electromovilidad en el sector minero del cobre ya ha empezado con el uso en transporte liviano como iniciativa para reemplazar combustible. Ejemplos de ello

son el uso de taxis y buses eléctricos para el traslado de trabajadores y de equipos en zonas de operación. En 2023, el 86% de las operaciones de la gran minería del cobre ya cuentan con planes de electromovilidad y/o transporte bajo en emisiones. En Codelco el 75% de sus operaciones ha avanzado en esta dirección, en tanto en la mediana minería, el 71% de sus operaciones cuentan con avances en la materia, mientras que la mitad de las plantas de Enami ya tiene planes de electromovilidad.

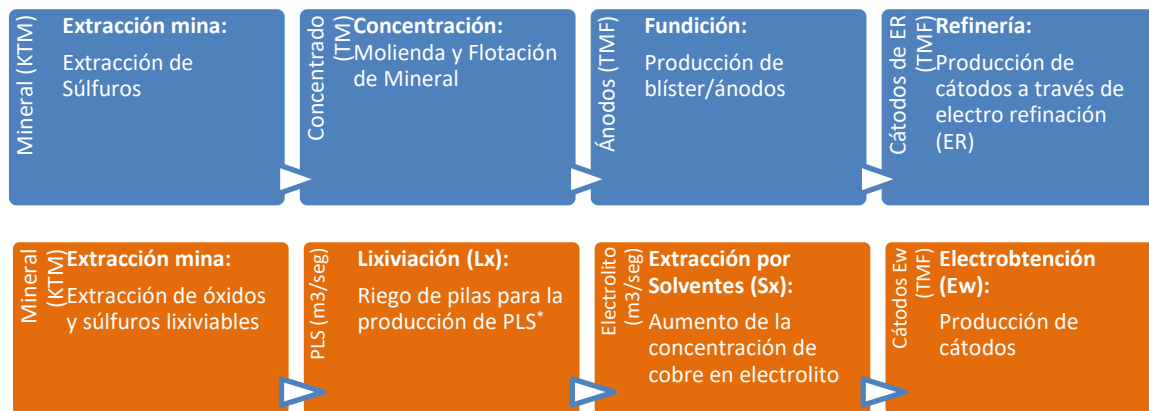
Es así, como la visión de largo plazo que se le da al negocio minero va de la mano con el desarrollo que tiene el sector energético, el cual en el último tiempo ha presentado varios avances pero también tiene desafíos futuros. Si el país sigue avanzando en la transición energética, existe una buena probabilidad de que el desarrollo del sector energético del país impulse a la minería a lograr los objetivos propuestos de tener una minería sustentable y que mitigue el cambio climático. Para que esto ocurra, es esencial que se aborden los desafíos como la transmisión e integración de la energía renovable a la matriz, entre otros. Asimismo, es fundamental que las empresas mineras continúen los esfuerzos para lograr la carbono neutralidad.

8. Anexo:

8.1. Metodología: Información por proceso

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.

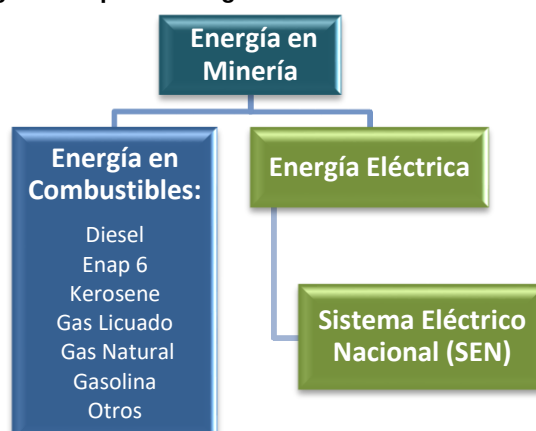
Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre



* 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. El suministro de electricidad proviene del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y 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 EMPAE está diseñada de forma que recoge información de producción de los principales procesos productivos mineros 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.

8.2. Metodología: 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
Escald 110	t	1	36.028

Fuente: Cochilco en base a información de conversión unidades de combustibles de la Agencia Chilena de sustentabilidad

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

8.2.1. 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).

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

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

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

8.2.2. 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.

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

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

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

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

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

9. Operaciones consideradas

Tabla 3 Operaciones consideradas en la edición 2023 de la EMPAE

EMPRESA	REGIÓN	TAMAÑO
Altonorte	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Amalia Catemu	V Valparaíso	Mediana Minería Privada
Andacollo	IV Coquimbo	Gran Minería Privada
Andina	V Valparaíso	Gran Minería Estatal
Antucoya	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Atacama Kozan	III Atacama	Mediana Minería Privada
Candelaria	III Atacama	Gran Minería Privada
Carmen Bajo	III Atacama	Mediana Minería Privada
Carola	III Atacama	Mediana Minería Privada
Caserones	III Atacama	Gran Minería Privada
Cenizas Cabildo	V Valparaíso	Mediana Minería Privada
Cenizas Taltal	II Antofagasta	Mediana Minería Privada
Centinela	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Cerro Colorado	I Tarapacá	Gran Minería Privada
Cerro Negro	V Valparaíso	Mediana Minería Privada
Chagres	V Valparaíso	Gran Minería Privada
Chuquicamata	II Antofagasta	Gran Minería Estatal
Collahuasi	I Tarapacá	Gran Minería Privada
El Abra	II Antofagasta	Gran Minería Privada
El Soldado	V Valparaíso	Gran Minería Privada
El Teniente	VI O'Higgins	Gran Minería Estatal
Escondida	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Franke	II Antofagasta	Mediana Minería Privada
Gabriela Mistral	II Antofagasta	Gran Minería Estatal
La Patagua	V Valparaíso	Mediana Minería Privada
Lomas Bayas	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Los Bronces	RM Metropolitana	Gran Minería Privada
Los Pelambres	IV Coquimbo	Gran Minería Privada
Mantos Blancos	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Mantos de la Luna	II Antofagasta	Mediana Minería Privada
Mantoverde	III Atacama	Gran Minería Privada
Michilla	II Antofagasta	Mediana Minería Privada
Ministro Hales	II Antofagasta	Gran Minería Estatal
Ojos del Salado	III Atacama	Mediana Minería Privada
Pampa Camarones	XV Arica y Parinacota	Mediana Minería Privada
Planta Delta	IV Coquimbo	Mediana Minería Estatal
Planta Matta	III Atacama	Mediana Minería Estatal
Planta Paipote	III Atacama	Mediana Minería Estatal
Planta Salado	III Atacama	Mediana Minería Estatal
Planta Taltal	II Antofagasta	Mediana Minería Estatal
Planta Vallenar	III Atacama	Mediana Minería Estatal
Quebrada Blanca	I Tarapacá	Gran Minería Privada
Radomiro Tomic	II Antofagasta	Gran Minería Estatal
Salvador	III Atacama	Gran Minería Estatal
San Andrés	III Atacama	Mediana Minería Privada
San Gerónimo	IV Coquimbo	Mediana Minería Privada
Sierra Gorda	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Spence	II Antofagasta	Gran Minería Privada
Tres Valles	IV Coquimbo	Mediana Minería Privada
Valle Central	VI O'Higgins	Mediana Minería Privada
Ventanas	V Valparaíso	Gran Minería Estatal
Zaldivar	II Antofagasta	Gran Minería Privada

Fuente: Cochilco

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

Rossana Brantes Abarca

Analista de Dirección de Estudios y Políticas Públicas

Jaime Moreno

Analista de Dirección de Estudios y Políticas Públicas

Patricia Gamboa

Directora de Estudios y Políticas Públicas

Septiembre / 2024

Copyright by Cochilco, todos los derechos reservados

Se autoriza la reproducción total o parcial de este Informe, siempre que la fuente “Comisión Chilena del Cobre” y/o “Cochilco” sea citada, salvo que se indique lo contrario.

