



Las energías renovables en la minería chilena del cobre

DEPP 06/2021

Registro Propiedad Intelectual n° 2021-A-7321

INDICE

INDICE.....	2
RESUMEN.....	3
I. INTRODUCCION.....	3
II. METODOLOGIA	6
2.1 Preguntas de Encuesta.....	7
III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	7
3.1 Contexto Energético Chileno	7
Situación de referencia	7
La revolución energética en Chile	8
Mercado eléctrico, legislación y política energética	8
Política energética 2050	10
Ruta energética 2018 -2022	10
Plan de mitigación de GEI.....	11
Agenda 2030 para el desarrollo sostenible: energía asequible y no contaminante	11
Camino hacia la descarbonización e integración de energías renovables	12
3.2 Resultados Encuesta	14
Oportunidades/ventajas para incorporar energías renovables en la minería nacional	18
Beneficios cualitativos y cuantitativos para una empresa minera de desarrollar proyectos de generación de energías renovables.....	18
¿Cuál será el impacto de los cambios regulatorios del sector energético en la industria minera?	19
Aspectos que se verán beneficiados/afectados en el negocio minero por los cambios regulatorios del sector energético del país	19
3.3 Casos de Uso de Energías Renovables en Minería en Chile	21
3.3.1 Porcentaje de uso de energías renovables en minería del cobre chilena.....	24
3.3.2 Uso de Hidrógeno Verde	26
3.3.3 Otras Iniciativas	27
IV. COMENTARIOS.....	28
V. CONCLUSIONES	30
VI. REFERENCIAS.....	33

RESUMEN

Chile tiene importantes ventajas comparativas en la minería, atrayendo grandes inversiones en el pasado que han multiplicado por cinco la producción de cobre y posicionado al país como el principal productor mundial de cobre. Estas ventajas han disminuido debido a la caída de la ley del mineral, la profundización de los depósitos, el agotamiento de los minerales de lixiviación y la disminución de la productividad total del factor. Además, el precio de la energía fue en algún momento el más alto de la minería en el mundo, debido al aumento de la capacidad de generación con las centrales térmicas. La industria minera enfrenta grandes desafíos en términos de energía: (i) el consumo intenso de combustibles y electricidad representa alrededor del 14% del consumo agregado del país y el 33% del consumo nacional de electricidad; (ii) se ha estimado un aumento en la demanda de energía del 41% para los próximos 11 años; (iii) la necesidad de un suministro constante y seguro; (iv) el costo de la energía eléctrica; y (v) la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso eficiente de la energía. En el país, desde 2016, comenzó un desarrollo acelerado de energía renovable no convencional fotovoltaica y eólica, que ha disminuido el precio de la energía eléctrica y posibilita asimismo mejorar la sostenibilidad de la minería, reduciendo considerablemente la huella de carbono. Este artículo busca responder si es posible incorporar las energías renovables en la minería, cuál es su alcance y en qué estado se encuentra. Para esto, se revisa el contexto energético en Chile y en la minería del cobre, las causas del desarrollo acelerado de las energías renovables, su posible evolución y sus efectos en la minería, como la posibilidad de reemplazar el uso de diésel, mitigar el costo de una creciente demanda de electricidad debido al uso de agua de mar y una importante producción de concentrado y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria.

I. INTRODUCCION

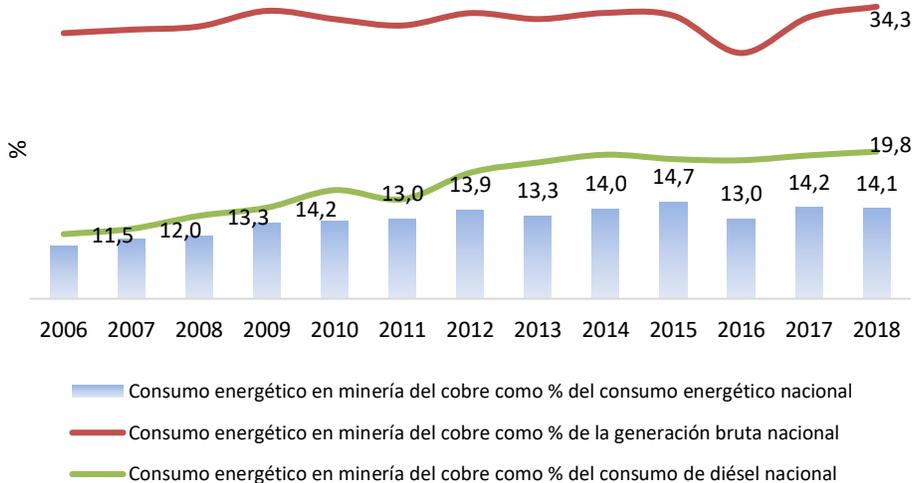
Chile tiene importantes ventajas comparativas en la minería y a partir de 1990 se convirtió en un polo de atracción para las inversiones mineras, en particular, en la minería del cobre con las grandes reservas de minerales de buena ley, óxidos, mixtos y sulfuros, la estabilidad política, social, legal y normativa en el país que aseguran además la propiedad y el régimen tributario.

Con el tiempo las ventajas comparativas han ido disminuyendo debido a la caída de las leyes de cabeza, incremento de la razón estéril mineral, profundización de las minas, escasez de agua en la zona norte donde está emplazada la mayor parte de la producción de cobre (lo que obliga a utilizar agua de mar, con un alto costo de inversión y de operación), el agotamiento de los minerales oxidados, mayores restricciones ambientales y de

disponibilidad de terreno para emplazar los depósitos de relaves y elevado precio de la energía eléctrica, que llegó a ser uno de los más altos en mundo.

Con todo, la producción chilena de cobre sigue en aumento y su posición continúa siendo fuerte. Chile tiene las mayores reservas y continúa siendo el primer productor de cobre del mundo, con una producción en el año 2019 de 5,787 millones de toneladas de cobre fino (27,2% de la producción mundial) (Cochilco, 2020). A nivel nacional, la minería del cobre es esencial para la economía, en la última década ha sido entre un 8% y 10% del PIB, un 40% y 50% de las exportaciones y entre 10% y 30% de los ingresos fiscales; además, entre 1990 y 2019 las inversiones en la minería del cobre han sido alrededor de US\$ 25.000 millones (Cifuentes, C., 2020). Asimismo, tiene importantes efectos como generar empleos directos y también activar a empresas proveedoras, de ingeniería y construcción, de servicios, de transporte, mover la actividad local y regional.

Figura 1: Participación del consumo energético minero dentro del consumo energético nacional



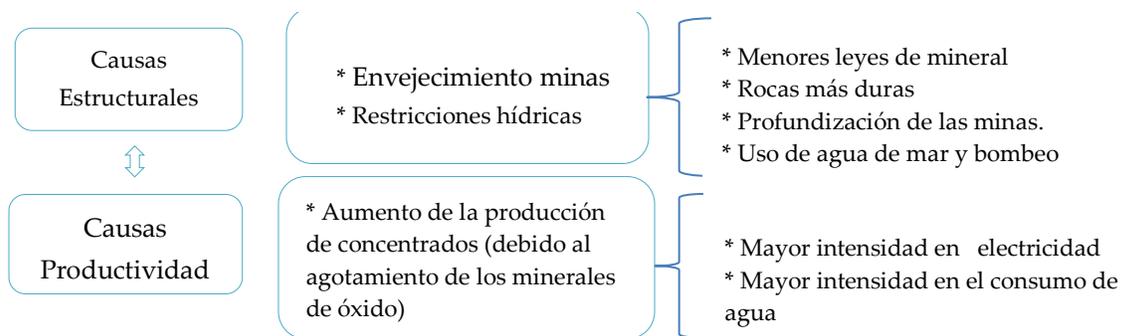
Fuente: Cochilco en base a datos propios y el Anuario Estadístico de Energía 2019 (Comisión Nacional de Energía, 2020)

En términos energéticos, la minería del cobre tiene un uso intensivo de energía (combustibles y electricidad) y en el año 2019 la industria tuvo un consumo total de energía de 175.134 TJ, lo que representa alrededor del 14% del consumo agregado del país, de este total, 89.769 TJ corresponden al consumo de energía eléctrica (alrededor del 34% del consumo nacional de energía eléctrica), mientras que el consumo de diésel, el principal combustible minero, representa un 19,8% del consumo nacional de diésel.

En este consumo energético, el eléctrico es el mayor gasto con USD 2.339 millones (frente a los USD 1031 millones por combustible), representando así alrededor del 9% de los costos de producción de cobre en Chile (el gasto por combustible representa ~5%) (Cochilco, 2020).

En la última década, la tasa de consumo de energía minera ha estado creciendo más rápidamente que su tasa de producción de cobre, las principales causas se describen en la Figura 2. Además, se espera un aumento de la producción de cobre en los próximos 11 años, con el correspondiente aumento en la demanda de energía (debido a una mayor producción y al fomento de las causas expuestas en la Figura 2), particularmente el consumo de electricidad aumentará un 34% para 2031, con la concentración y el uso del agua de mar como los procesos más exigentes de electricidad (Cochilco, 2020).

Figura 2: Causas del creciente consumo de energía en la producción minera de cobre en Chile



Fuente: Cochilco, 2020

Además, el sector minero enfrenta hoy en día la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria; en Chile y en todo el mundo, cada vez es más importante la forma en que se genera energía que solo su costo; Esto se ve acentuado por el cambio climático y los acuerdos internacionales que el país ha suscrito para reducir las emisiones de efecto invernadero y para tener un desarrollo sostenible. En este contexto, Chile ha ido desarrollando también regulaciones entre las que están las normas en calidad del aire, las cuales restringen las emisiones del material particulado en la extracción minera y en las plantas de tratamiento de minerales, así como del azufre, arsénico y otros elementos en los gases de las fundiciones; lo que ha conducido a reemplazar algunos combustibles usados en los procesos mineros, como por ejemplo el petróleo pesado por gas natural, y a disminuir el consumo de combustibles; por ejemplo, el uso de quemadores oxy-fuel en vez de quemadores convencionales, contribuyendo así a desarrollar una minería más sustentable.

Es así como, la industria minera enfrenta una serie de desafíos, como el consumo de energía intenso y creciente, el alto costo de la electricidad, la necesidad de un suministro de energía constante y seguro, y ahora necesita tener un suministro de energía más armonioso con el medio ambiente. De ahí la gran importancia del rápido aumento de las energías renovables en la red eléctrica del país. Antiguamente, las grandes y medianas empresas mineras usaban autogeneración eléctrica y algunas de ellas están mirándolo ahora como una oportunidad, sea a través de sus propias plantas generadoras, mediante plantas de energías renovables no convencionales, a través del reaprovechamiento energético en sus procesos o la asociación con empresas generadoras.

A continuación, en este estudio se busca responder si es posible la incorporación de energías renovables en la minería, cuál sería su alcance y en qué estado se encuentra, para ello se revisa el contexto y desafíos en materia energética en Chile y en la minería; las causas del desarrollo acelerado de las energías renovables y su posible evolución y sus efectos en la minería, en la materia para luego buscar en la literatura sobre las principales tecnologías de energías renovables y posteriormente analizar el vínculo entre desarrollo de energías renovables y minería del cobre, y la incorporación de energías renovables en minería.

II. METODOLOGIA

En una primera parte se realizó una revisión bibliográfica, de políticas públicas en materia energética, del desarrollo de las energías renovables en particular de las no convencionales en Chile, así como su uso en la minería del cobre, en información pública y en artículos de revistas especializadas en energía y minería. Posteriormente se utilizó un método cualitativo de encuestas a expertos en materia energética en Chile para recopilar descripciones con respecto a su visión del desarrollo e incorporación de las energías renovables en Chile y en la minería del cobre, y así poder analizar si es posible la incorporación de estas energías en la minería, cuál sería su alcance, su posible evolución y sus efectos en la minería. Para ello se diseñó una encuesta con nueve preguntas que se realizó durante febrero y marzo 2019. Los encuestados fueron 15 y trabajan como expertos en energía, energías renovables tanto en sector público como en las empresas mineras, asociaciones gremiales de energías renovables no convencionales, consultoras especializadas en energías renovables y energía. Estos encuestados fueron seleccionados por su conocimiento del tema. Por lo tanto, pueden considerarse expertos en la materia que son capaces de responder objetivamente las preguntas de la encuesta. En una tercera etapa se hace una revisión bibliográfica de casos de mineras chilenas que usen energías renovables en sus procesos.

2.1 Preguntas de Encuesta

Se utilizaron las siguientes preguntas de investigación: (1) Identificación: Nombre, Cargo, Institución/Empresa; (2) ¿Es posible usar energías renovables no convencionales directamente en los procesos productivos mineros como extracción mina, concentración, lixiviación, refinería, fundiciones, servicios, campamentos; (3) Señale ¿en cuáles procesos se puede incorporar directamente el uso de las energías renovables no convencionales y de qué forma etc.?; (4) Dado el contexto energético actual del país, ¿cómo cree Ud. que la industria minera puede fomentar el desarrollo e incorporación de la energías renovables no convencionales en nuestra matriz energética?; (5) ¿Cuáles son las barreras para incorporar energías renovables no convencionales en la minería?; (6) ¿Qué oportunidades/ventajas existen en la actualidad para incorporar energías renovables no convencionales en la minería nacional?; (7) ¿Qué beneficios cualitativos y cuantitativos vislumbra para una empresa minera de desarrollar proyectos de generación de energías renovables no convencionales?; (8) ¿Cuál será el impacto de los cambios regulatorios del sector energético en la industria minera?; (9) ¿Qué aspectos se verán beneficiados/afectados en el negocio minero por los cambios regulatorios del sector energético del país? Por ejemplo, baja en el precio de electricidad, un suministro constante y seguro, etc.

III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Contexto Energético Chileno

Situación de referencia

En los últimos 30 años, Chile ha enfrentado regularmente el desafío continuo de encontrar suministros de energía adicionales para apoyar el crecimiento económico. A pesar de tener significativos recursos hidroeléctricos, las sequías son frecuentes; Además, Chile tiene energía fósil muy limitada y debe importar carbón, petróleo, derivados del petróleo y gas natural. Chile tiene una geografía única y los mercados energéticos estaban desarticulados regionalmente, particularmente con redes de gas y electricidad regionales no conectadas y con dos sistemas principales de transmisión eléctrica: el central (SIC) y el del norte grande (SING) (que hoy conforman el Sistema Eléctrico Nacional SEN).

El sector energético chileno ha enfrentado tres períodos de estrés significativo en las últimas décadas. El último episodio tomó lugar 2007-2010, con un corte de suministro de gas desde Argentina y un gran terremoto a principios de 2010 que afectó a las redes eléctricas y refinерías y causó varios apagones, seguidos de otro período prolongado de

sequía de cinco años, por lo que el sector energético ha estado tratando una dificultad tras otra. Todo esto ha llevado a Chile a depender de las importaciones para cubrir las tres cuartas partes de sus necesidades energéticas y tener las facturas de electricidad más caras de Latinoamérica. Sin embargo, hay otro factor importante que explicaba los altos precios; había muy poca competencia en el mercado de la electricidad. El sector estaba dominado por empresas monopolísticas de servicios públicos, y el plan del sector privado para resolver el déficit consistía en desarrollar enormes centrales eléctricas de combustión de carbón que son conocidas por su contaminación y construcción de enormes represas hidroeléctricas con una oposición fuerte de la sociedad civil (Bravo, Urrutia, & Cia, 2016). Es así como se requería un cambio importante para sacar a Chile de las constantes dificultades energéticas y hacer al país menos vulnerable y dependiente del suministro de energía extranjera y para promover las energías renovables no contaminantes, más adecuadas para un crecimiento sostenible y cumplir compromisos internacionales en cambio climático que el país ya había suscrito.

La revolución energética en Chile

A raíz de la crisis por la suspensión del envío de gas por Argentina, se decide crear el Ministerio de Energía, que se concreta en febrero del 2010. Se manejaba en ese tiempo el proyecto de construir y operar cinco grandes centrales hidroeléctricas en Aysén, que no se concretó, fundamentalmente por razones ambientales y oposición de la comunidad. En paralelo se iniciaron los estudios para aprovechar el gran potencial del país para la generación de energías renovables no convencionales. El año 2014, el ministro de energía de la época consideró que el problema energético ya estaba bien estudiado y decide tomar acción, descartando la central hidroeléctrica de Aysén, empujando la aprobación de leyes energéticas en el parlamento que estimulara las energías renovables no convencionales y la interconexión SIC - SING.

Mercado eléctrico, legislación y política energética

En los últimos años el Estado y los agentes privados han logrado avanzar en mejoras significativas para un escenario energético más eficiente en Chile. En primer lugar, se destaca la creación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que abarcará casi la totalidad del territorio nacional, y que en pleno funcionamiento (se espera en julio 2019), repercutirá en menores costos, permitirá optimizar el uso de los recursos de generación ya disponibles y hacer un mayor aprovechamiento de las energías renovables. El norte tiene un alto potencial para la generación de energías renovables no convencionales, que, por el momento, tiene un bajo factor de planta, que se compensará con energía hidráulica proveniente de las regiones centro y sur (Coordinador eléctrico Nacional, 2020). El factor de planta (o factor de capacidad neto o factor de carga) de una central eléctrica es el

cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente de forma anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme valores nominales placa de identificación de los equipos. Es una indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo.

En línea con lo anterior, en 2016 se promulgó la Ley de Transmisión Eléctrica, con la cual se han generado cambios significativos en el mercado así como en la dinámica de licitaciones para la provisión de energía eléctrica. De este modo, actualmente hay una mayor cantidad de proveedores, lo que se traduce en menores precios de la energía a clientes regulados, situación que eventualmente repercutirá en los grandes contratos mineros fijados a largo plazo. Al mismo tiempo se ha favorecido la integración de las energías renovables no convencionales. El nuevo marco legal dado por esta ley ya mostró resultados positivos, con una fuerte disminución de precio de adjudicación de proyectos de energías renovables no convencionales en las licitaciones de 2016 y 2017 (Ministerio de energía, 2020). Con todo, considerando los puntos anteriores, si bien los desafíos en demanda energética siguen siendo crecientes, la matriz energética ha obtenido avances importantes que permiten anticipar mejoras en la seguridad del suministro eléctrico a costos progresivamente menores, situación que mejorará la posición competitiva de la industria cuprífera nacional. Todos estos cambios ayudan en asegurar el abastecimiento necesario para satisfacer la producción minera, y en segundo lugar, mantener los costos acotados a fin de lograr una mayor rentabilidad en los proyectos y obtener una posición competitiva en el mercado.

Por último, otro elemento que ha cobrado una relevancia creciente en los últimos años es la consecución de mejoras de eficiencia en el uso de energía y tener menores emisiones de gases de efecto invernadero (mediante la generación y uso de energías limpias). Se está en un mundo cada vez más globalizado, cambiando rápidamente, impulsado por las tendencias socioeconómicas globales, el cambio climático, por una mayor importancia a nivel mundial de contar con un desarrollo ambientalmente sustentable, y por los rápidos avances en ciencia y tecnología. En este contexto para que la minería de cobre continúe siendo un fuerte impulsor del crecimiento económico en Chile, deberá adaptarse a estas condiciones cambiantes y aprovechar estas oportunidades. Por lo tanto, hay suficientes motivaciones para innovar en eficiencia energética en este sector en Chile.

Sin embargo, hay aspectos que pueden actuar como barreras para implementar o generalizar medidas de eficiencia energética en las minas de cobre; como ser, la singularidad de cada una de ellas, los costos de innovar, la complejidad para innovar en faenas ya operando, la tendencia a seguir haciendo siempre lo mismo.

En los últimos años el Estado trabajó en el diseño de una Ley de Eficiencia Energética que se aprobó en enero del 2021. Esta Ley apunta a tres objetivos claves: la implementación de un sistema de gestión de energía en empresas con altos consumos de energía, el establecimiento de un plan anual de eficiencia energética con metas concretas de reducción en el tiempo, y la contratación de auditorías energéticas técnicas externas de carácter periódico que validen y verifiquen las medidas de eficiencia energética identificadas, evaluadas e implementadas, junto a los ahorros logrados. Cabe destacar que en el año 2015 la gran minería de cobre aceptó realizar auditorías en eficiencia energética en el contexto de la elaboración del borrador de propuesta de esta ley por parte del Ministerio de Energía, siendo así el primer sector económico en colaborar con esta nueva propuesta de ley y, como resultado, el sector minero de cobre proporcionó información estratégica importante de eficiencia energética que mostró ahorros potenciales en el consumo de energía. Además una ley de eficiencia energética en Chile, ayudará a implementar medidas de eficiencia energética no sólo en el sector minero sino que en todos los sectores en Chile; aun así, el país tiene que hacer frente a los desafíos en materia de eficiencia energética como el desarrollo de capacidades de capital humano que puede realice diagnósticos energéticos oportunos y efectivos, implemente sistemas de gestión de energía y promueva e implemente innovación tecnológica, y todo basado en una medición y verificación correctas de los indicadores de eficiencia energética (Ministerio de Energía, 2021).

Política energética 2050

Con el fin de fortalecer las políticas en materia energética, el gobierno de Chile, mediante su agenda de Política Energética 2050, busca impulsar una energía confiable, sostenible, inclusiva y competitiva. Para alcanzar esta visión al 2050, la Política Energética se sustenta en 4 pilares: Seguridad y Calidad de Suministro; Energía como Motor de Desarrollo; Compatibilidad con el Medio Ambiente y Eficiencia y Educación Energética. Sobre estas bases, están desarrollándose diversas medidas y planes de acción planteados hasta el año 2050. En relación con el pilar Compatibilidad con el Medio Ambiente, este considera implementar políticas que aborden paralelamente dos grandes desafíos: El impulso de una matriz energética renovable y el desarrollo de lineamientos para abordar los impactos medioambientales (Ministerio de energía 2015).

Ruta energética 2018 -2022

Con el lanzamiento en 2018 por parte del Gobierno de la Ruta Energética 2018 -2022, se define el camino y prioridades en materia energética para este período para el país. Esta Ruta, formulada bajo el marco de la Política Energética 2050, contiene diferentes ejes relativos a trabajar con énfasis en “diez mega compromisos”, entre los cuales se alcanzará cuatro veces la capacidad actual de generación distribuida renovable de pequeña escala

(menor a 300 KW) al 2022; establecerá un marco regulatorio para la eficiencia energética que genere los incentivos necesarios para promover el uso eficiente de la energía en los sectores de mayor consumo (industria y minería, transporte y edificaciones), y creará una verdadera cultura energética en el país; iniciará el proceso de descarbonización de la matriz energética a través de la elaboración de un cronograma de retiro o reconversión de centrales a carbón, la introducción de medidas concretas en electromovilidad; capacitará a trabajadores, técnicos y profesionales, desarrollando competencias y habilidades en la gestión y uso sostenible de la energía, en el sector eléctrico, de combustibles y de energías renovables (Ministerio de energía, 2018).

Plan de mitigación de GEI

El ministerio de energía elaboró un Plan de mitigación de Gases de Efecto Invernadero en el año 2017, que fue elaborado en respuesta a compromisos adquiridos por Chile a nivel internacional para hacer frente a los efectos del cambio climático y en coherencia con las metas que plantea la Política Energética Nacional al 2050, así como en el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (PANCC). Dentro de este Plan, se establecen medidas específicas para la industria y la minería al 2035 y al 2050: a) medidas en Eficiencia Energética, b) Incrementar el Uso de Tecnologías de Bajas Emisiones c) Apoyo a la implementación de tecnologías bajas en carbono. Dentro de los puntos b y c se tienen metas de tener al menos 50% de combustibles bajos en emisiones de GEI y de contaminantes atmosféricos en la matriz de combustibles. Se considera la opción de evaluar la sustitución del diésel utilizado como combustible en maquinaria pesada por otros con menores emisiones como GN, hidrógeno electricidad (Plan mitigación energía, 2017).

Agenda 2030 para el desarrollo sostenible: energía asequible y no contaminante

En Septiembre del 2015, Chile como parte de 193 países miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU), suscribió y comprometió el cumplimiento de un nuevo programa de desarrollo sostenible llamado “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”. Esta es una agenda universal con un plan de acción mundial durante los próximos 15 años en favor de la inclusión social, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico, contiene 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). EL ODS N°7 Energía asequible y no contaminante explicita que se debe aumentar el uso de energía limpia y no contaminante como las renovables en diferentes sectores, así como que son necesarias inversiones públicas y privadas en energía para ello y también para adoptar nuevas tecnologías.

Es así como se observa que el sector minero enfrenta mayores estándares de sustentabilidad, por tanto se ha abierto una ventana para incorporar el uso de energía con tecnologías limpias como las energías renovables convencionales y no convencionales en la industria.

Camino hacia la descarbonización e integración de energías renovables

Hasta 1990, la generación de energía del Sistema Central era esencialmente hidráulica y el Sistema del Norte se basaba en centrales eléctricas de carbón. En 2014, la capacidad de generación instalada era de alrededor de 20 GW y el 63% de esta capacidad provenía de combustibles fósiles. Ese año, como se mencionó anteriormente, el ministro de energía de la época decidió promover la aprobación de las leyes de energía en el parlamento para estimular la generación de energías renovables no convencionales y la interconexión del suministro de electricidad del Sistema Central (SIC) y del Norte (SING).

Figura 3 Evolución de la Capacidad Instalada de Energías Renovables No Convencionales en Chile



Fuente: ACERA, junio 2021

Desde entonces, el país ha triplicado la participación de las Energías Renovables No Convencionales en la matriz, alcanzado un 28% de la capacidad instalada, principalmente en centrales eólicas y solares (ACERA y Ministerio de Energía 2021).

Una parte relevante de esta nueva energía son centrales que usan el sol como principal energético. El norte de Chile comparativamente tiene una altísima radiación a nivel mundial, y el Desierto de Atacama tiene la mayor radiación solar del mundo con 275 Watts por m², lo que resulta favorable para el uso de energías renovables no convencionales basadas en energía solar y un gran potencial estimado (Energías Renovables, ministerio de energía, 2019). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados al 2021 Chile tiene aún una matriz energética que depende fuertemente de combustibles fósiles importados.

La meta es cambiar esta estructura, tener una matriz con energías limpias y con autonomía y así incorporar fuertemente las energías renovables y ya para el 2030 tener al menos un 70% de la generación eléctrica nacional que provenga de energías renovables. En todo caso,

se han realizado ya esfuerzos para ello. Un paso importante fue el acuerdo voluntario entre el Gobierno de Chile y las empresas socias de la Asociación de Generadoras de Chile, AES Gener, Colbún, Enel y Engie en 2018, en cuanto a no iniciar nuevos desarrollos de proyectos a carbón que no cuenten con sistema de captura y almacenamiento de carbono u otras tecnologías equivalentes y a crear un Grupo de Trabajo coordinado por el Ministerio de Energía, para que analice los elementos tecnológicos, ambientales, sociales, económicos, de seguridad y de suficiencia de cada planta y del sistema eléctrico en su conjunto, entre otros, que permita establecer un cronograma y las condiciones para el cese programado y gradual de la operación de centrales a carbón que no cuenten con sistemas de captura y almacenamiento de carbono u otras tecnologías equivalentes (Mesa de Trabajo de Descarbonización, 2019). Es así como en junio 2021, el gobierno anunció el nuevo Plan de Aceleración de Descarbonización el cual plantea el cierre adelantado de centrales termoeléctricas a carbón al 2025 quedando el nuevo cronograma con 8 centrales a retiro al 2021 y 18 centrales a retiro al 2025, por tanto quedarían 10 de las 28 centrales a carbón actualmente operando entre 2026 y 2040.

Asimismo otra iniciativa en la materia, es la moción parlamentaria que se materializó en un Proyecto de Ley que en junio 2021, la Cámara de Diputados aprobó y que prohíbe la instalación y funcionamiento de centrales a carbón a partir del 31 de diciembre del 2025 y busca cerrar inmediatamente las centrales que tengan más de 30 años de antigüedad al momento de promulgar la Ley. Actualmente este proyecto está en el Senado en discusión.

Si bien existe un importante desafío para cumplir estas metas de incorporación de energías renovables en la matriz energética chilena, hoy hay una gran oportunidad en cuanto al desarrollo de estas energías, empujado por una gran caída en los costos de inversión. En los últimos años ha habido una caída de entre un 25% a 65% para centrales solares Foto Voltaicas, caída de entre un 40% a 65% para Concentración Solar de Potencia (CSP), caída de entre un 10% a 23%, en algunos casos, para centrales eólicas onshore y caída de un 18%, en algunos casos, para centrales geotérmicas. Ello sumado a la gran reforma al sistema eléctrico impulsada por el ministerio de energía entre el 2015 y 2017, logró atraer nuevos actores al sector, hacerlo más competitivo y la licitación realizada fue adjudicada a totalidad a ofertas de energías renovables no convencionales, todas más baratas que las ofertas convencionales contra las que compitieron), con precios de energía inusualmente bajos. La licitación de distribución de noviembre de 2017, por ejemplo, alcanzó un valor promedio de US\$32,5/MWh, muy por debajo de los casi US\$100/MWh que existía como estándar en el 2015 (Reportaje El puzzle energético en la minería, 2018).

Es así como el desarrollo de las energías renovables no convencionales abre una oportunidad única para Chile de contar con energía limpia (reducción de emisiones), de

seguridad energética, disminuir la dependencia de energía importada, proveer precios competitivos y aprovechar características ventajosas geográficas únicas que tiene el país por ejemplo en materia de producción de energías renovables no convencionales. Si hay todavía que resolver temas como la congestión en la transmisión, lo que está causando restricciones a las energías renovables no convencionales,” señala Ian Nelson, CEO de Energía Llaima.

Contratos PPA

Los acuerdos de compra de energía PPA (Power Purchase Agreement), son contratos en que una parte se compromete a generar electricidad a largo plazo y la otra, a comprársela en igual período. Los contratos de PPA se caracterizan por definir todos los términos de la venta de la electricidad. El contrato fijará cuándo empezará la operación, los plazos de entrega de la electricidad o términos de pago, entre otros. En el norte del país, las mineras son el principal poder comprador de energía de la zona. La creciente presencia de las energías renovables en la oferta del mercado energético y los cambios regulatorios en el sector eléctrico para incentivar el desarrollo de estas energías, permiten el desarrollo de acuerdos de compra de energía renovable no convencional, PPAs, con mineras. Una opción para las mineras es desarrollar acuerdos de suministro con proveedores renovables a precios competitivos para asegurar buenas tarifas en los próximos años y mejorar su competitividad y con energías limpias.

3.2 Resultados Encuesta

A continuación, se resumen las respuestas a la pregunta de la Encuesta:

¿Es posible usar energías renovables no convencionales directamente en los procesos productivos mineros?

El total de los encuestados coincidió en que si es posible incorporar el uso de las energías renovables no convencionales directamente en procesos productivos mineros. En aquellos procesos que requieren energía eléctrica el uso es directo y su uso es más apropiado como un complemento a la energía de la red. Si se considera autogeneración eléctrica con energías renovables no convencionales, es aplicable a todos los consumos eléctricos dentro de la mina, lo que dado que la intermitencia de la generación con estas energías dificulta su uso exclusivo, entonces puede que algunos necesiten complementarse con sistemas de almacenamiento.

Para aquellos procesos donde se quiere energía térmica hay que hacer procesos de adaptación tecnológica. Los procesos que utilizan bajas temperaturas pueden utilizar

técnicas simplificadas de concentración solar, y bombas de calor. Para los procesos que requieren mayores niveles de temperatura, es posible adaptar tecnologías de concentración solar, producción y utilización de biogás para reemplazar a los combustibles fósiles. Finalmente, también es posible electrificar procesos que hoy usan energía térmica a energía eléctrica.

Ejemplo: hoy ya hay mineras que pueden calentar fluidos usando paneles solares para el proceso de lixiviación y así mantener la temperatura de la pila, como también en fluidos que se utilizan en electroobtención o electro refinación o capturar calor sobrante desde los procesos térmicos. También se puede calentar agua sanitaria para los servicios y campamentos. Otras posibilidades son uso de las energías renovables no convencionales en procesos térmicos como un aporte complementario a las calderas convencionales, en secado de concentrado.

Cabe señalar que si bien la minería necesita energía térmica en sus procesos y esta potencialmente podría ser reemplazada 100% por energía solar térmica, la autogeneración eléctrica es una opción 100% viable si los contratos eléctricos vigentes la permiten.

Los modelos de negocio son de largo plazo al igual las faenas mineras. Las operaciones mineras no son especialistas en energía, otra opción y la tendencia en minería hoy es a contratar este tipo de servicios. A los generadores se les está solicitando tener contratos de energías renovables y se están colocando cláusulas de autoconsumo si es que las empresas desean instalar una "pequeña" planta en sus instalaciones.

También otros potenciales usos de energías renovables no convencionales directo en proceso mineros puede ser a futuro utilizar hidrógeno solar en el transporte y la instalación de plantas desaladoras que se alimenten de energías renovables tanto para proceso de desalinización como para el bombeo del agua a la faena.

¿La industria minera puede fomentar el desarrollo e incorporación de las energías renovables no convencionales en la matriz energética chilena?

Los resultados de la encuesta muestran la tendencia a considerar a la minería como un importante consumidor de energía y que es lógico que las decisiones que tomen como clientes podrían producir una reacción inmediata por parte de los suministradores de energía, tanto eléctrica como de combustibles fósiles. Por otro lado, el precio de las energías renovables está siendo cada vez más competitivo a nivel de mercado por lo que se ve el desplazamiento natural de las energías contaminantes por energías limpias. El inconveniente que aún se mantiene es la seguridad del sistema respecto a energía de base,

la cual por el momento seguirá siendo hidráulica de gran tamaño y térmicas. El avance en el almacenamiento en baterías sería la solución a mediano, largo plazo.

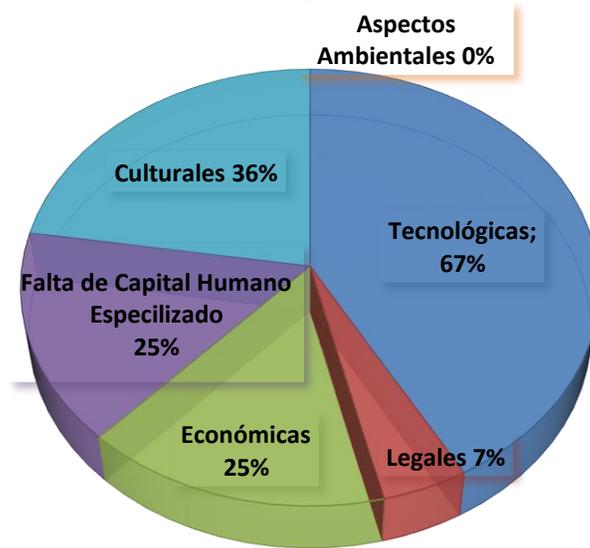
La inversión directa en proyectos de energía renovable, en proyectos de pilotaje, investigación y desarrollo que permitan la adaptación de algunas tecnologías energías renovables no convencionales a los procesos mineros y la adopción natural de estas energías por las mineras como parte de sus políticas/objetivos internos de descarbonización, es una medida para incrementar la capacidad instalada a nivel nacional. El segundo paso es invertir. Otra manera en que la industria minera puede contribuir en la incorporación de energías renovables no convencionales a la matriz energética del país, es incorporando un porcentaje de estas energías en su matriz insumo. La industria minera puede exigir a los proveedores energía renovable a través de los nuevos contratos de suministro. Por ejemplo, con la firma de Acuerdos de Compra de Energía (PPA) solicitando a sus proveedores tener incorporado a su sistema de producción o prestación de servicios energías renovables, el sector minero puede desempeñar un papel importante en el despliegue de energías renovables en el sistema de energía. Para facilitar esto sería recomendable contar con un sistema de certificación del origen de la energía. El Ministerio de Energía tiene una mesa de trabajo al respecto.

Cabe señalar, que hay casos, particularmente en el norte, en los que proyectos fotovoltaicos tienen que dejar de funcionar debido a la congestión de las líneas de transmisión en horas solares. En este escenario, la generación in situ aporta a la solución de este problema. Así la minería incrementaría el uso de energías renovables no convencionales diseñando sistemas de autoconsumo para los procesos mineros. Incorporando estas soluciones para el auto consumo en las instalaciones.

Principales barreras para incorporar energías renovables en la minería chilena

La Figura 4 muestra las principales barreras para incorporar energías renovables en la minería chilena mencionadas por los encuestados: Culturales (67%), Falta de Capital Humano especializado (47%), Económicas (47%), Legales (13%) y Tecnológicas (13%), el factor Ambiental tuvo un 0% de votación.

Figura 4: Principales barreras para incorporar energías renovables en la minería chilena

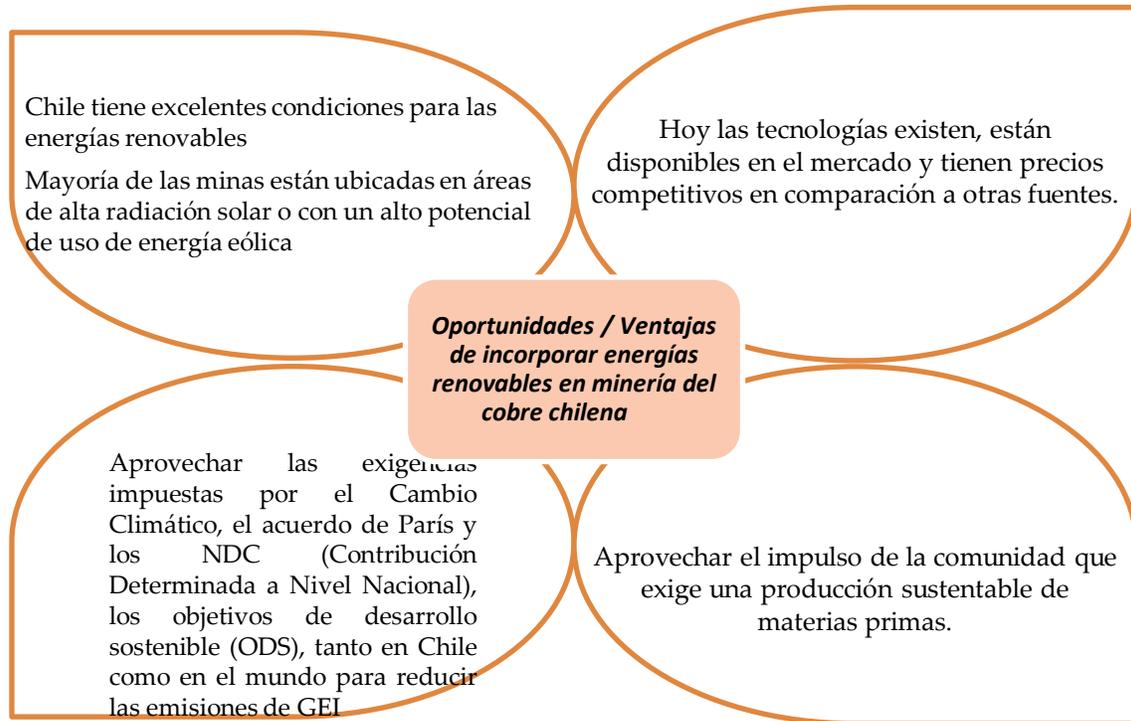


Otras barreras identificadas a través de la encuesta

- Falta de incentivos y conocimientos dentro del sector minero sobre energías renovables, como uno de los principales obstáculos, especialmente en jurisdicciones como en Chile, donde el entorno regulatorio está avanzado en relación con los proyectos de energía renovable (Sustainable Columbia report)
- Los PPA tienen que permitir el autoabastecimiento, y muchos no lo permiten.
- Los contratos actuales con los proveedores en la mayoría de las compañías son a muy largo plazo, presentan poca flexibilidad para incorporar energía renovable en cualquier momento del contrato, en la mayoría de los casos se debe esperar el término contractual para recién incorporar otro tipo de tecnología.
- Inercia

Oportunidades/ventajas para incorporar energías renovables en la minería nacional

Figura 5: Principales ventajas de incorporar energías renovables en la minería del cobre chilena



Beneficios cualitativos y cuantitativos para una empresa minera de desarrollar proyectos de generación de energías renovables

En Tabla 1, se resume lo que los encuestados opinan sobre los principales beneficios cuantitativos y cualitativos para una empresa minera de desarrollar proyectos de generación de energías renovables.

Tabla 1

Beneficios Cuantitativos	Beneficios Cualitativos
<p>⊗ Los beneficios económicos y de bajar costos energéticos por desarrollar proyectos de generación de energías renovables no convencionales se observan generalmente más allá de los 10 años debido a que la inversión inicial es alta.</p> <p>⊗ Por el lado de las plantas desaladoras y bombeo con energías renovables, tiene beneficios económicos y de seguridad del suministro. Por el lado de sistemas eléctricos y/o térmicos complementarios, tiene beneficios económicos.</p> <p>⊗ Las energías renovables reducen las emisiones de gases efecto invernadero, reducen la huella de carbono de las operaciones. También, al reducir el consumo de combustibles fósiles, genera beneficios en salud y en el medio ambiente al reducir la emisiones de contaminantes locales y globales.</p> <p>⊗ Con uso de energías renovables habría menos incertidumbre de precios de la energía en el largo plazo</p>	<p>⊗ Darle valor agregado al cobre, Cobre más verde pudiendo tener la minería una producción más sustentable acorde a los requerimientos de sustentabilidad del mercado, así como las exigencias ambientales y sociales que se están requiriendo actual y futuramente acorde al cambio de mentalidad de la población y así tener mayor aceptación por parte de la comunidad y la sociedad.</p> <p>⊗ Negocio más atractivo para los inversores y las industrias consumidoras que están interesadas en invertir / abastecerse en empresas mineras que tienen una huella de carbono más baja que sus rivales.</p> <p>⊗ El uso de energías renovables permite mejorar la imagen del producto, la empresa y la industria, la responsabilidad Social Corporativa.</p> <p>⊗ Tiene beneficios reputacionales por un lado coherencia con discurso de minería sustentable</p> <p>⊗ Principalmente diferenciación en el mercado.</p>

¿Cuál será el impacto de los cambios regulatorios del sector energético en la industria minera?

Los encuestados opinan que el impacto de los cambios regulatorios del sector energético en la industria minera son mayoritariamente de Mediano Impacto (53,3%), seguido por un 40% de Alto Impacto y finalmente un 6,7% de Bajo Impacto.

Aspectos que se verán beneficiados/afectados en el negocio minero por los cambios regulatorios del sector energético del país

Los resultados de la encuesta plantean que Chile tiene una oportunidad única con su radiación solar para posicionarse como un país con productos de cobre con bajo contenido de carbono y dado que la energía es una parte importante de los insumos del proceso

minero, todos aquellos cambios que impliquen reducir/aumentar costos, mejorar/reducir la confiabilidad del sistema influirán directamente en el sector minero. Principalmente la encuesta señala que los cambios del sector energético en los últimos años en Chile ha sido un factor clave principalmente para:

- Hacer posible la integración actual y futura de la energía renovable en la matriz energética del país, por tanto habrá mayor flexibilidad para incorporar sistemas de auto consumo por parte de mineras y tener suministro propio de energía, disminuyendo la presión sobre la matriz nacional, también abre la posibilidad de venta de excedentes.
- Al haber una mayor competencia entre los oferentes, hay mayor posibilidad para mineras de elegir a quien comprar la energía, lo que bajará los costos de electricidad. Mientras más competitivo es el sector energético, traspasa parte de esta competitividad a la minería.
- Otorgar así claridad al sistema desde el punto de vista de costos regulatorios, ha hecho que los precios de la electricidad al largo plazo serán menores a los actuales, por tanto esto debiera impactar los contratos privados de electricidad de la empresa minera, dando precios más atractivos para la industria minera y dado que la energía es uno de los principales costos operativos para las compañías mineras, esto será beneficioso para el sector al largo plazo.
- Dar más seguridad en el sistema de energía eléctrica y por tanto contribuyen a que mineras tengan un suministro seguro de electricidad.

Ahora bien, los resultados encuesta también señalan que en el corto plazo no hay muchas regulaciones que afecten el sector minero. Se tiene principalmente la próxima Ley de eficiencia energética, que impactará la forma en que se gestiona la energía en las compañías y será necesario implementar Sistemas de Gestión de la Energía. Por otro lado, se tiene las modificaciones a la Ley de transmisión, no obstante, se prevé que se clarificaran algunos puntos de dicha Ley no obstante no será cambios significativos. Por otro lado la ley de flexibilidad no debería impactar significativamente ya que busca regular el almacenamiento y otros servicios del sector energético.

El sector eléctrico hoy enfrenta desafíos en cuanto a la construcción de infraestructura de transmisión, que es fundamental para lograr llevar la energía renovable que es limpia y económica hacia los centros de consumos. Los cambios regulatorios que impliquen destrabar estos proyectos de inversión, serán sin duda de gran impacto en la minería.

3.3 Casos de Uso de Energías Renovables en Minería en Chile

Chile tiene un enorme potencial para desarrollar energías renovables: la zona norte tiene una altísima irradiación solar, es posible instalar energía eólica con un factor de planta razonable en todo el país, tiene un alto potencial en energía geotérmica y también un potencial para la energía marina en su costa. En la actualidad, el desarrollo principal de energías renovables en Chile se basa en energía renovable no convencional, la fotovoltaica, solar térmica y eólica.

Por otro lado, en los últimos años los precios para las energías renovables no convencionales en minería han sido cada vez más competitivos. Ahora bien, gran parte de la industria minera firmó sus contratos de suministro en épocas en que existía escasez de oferta de energía, por lo que había contratos que superan los US\$100/MWh (Felipe Castellón, Analista de Planificación y Gestión de CAP). Las empresas de generación eólica dicen que pueden suministrar energía a las minas por US\$80 MWh, el valor de la concentración solar de potencia, es del orden de los US\$50/MWh y la fotovoltaica se ubica entre US\$21 y US\$23 el MWh (Rodrigo Mancilla, Director Ejecutivo del Comité Solar de Chile).

En este contexto, cabe señalar el uso de energías renovables en la minería chilena, como el de la energía solar ha sido gradual, a pesar de que: a) el gobierno ha alentado el desarrollo de estas energías y su introducción en la matriz energética, b) los costos de estas energías han disminuido y son más convenientes que algunas energías convencionales.

Las principales razones para ello son:

- las operaciones mineras, necesitan un suministro constante para extraer y procesar minerales las 24 horas del día, y la solar y eólica por ahora son intermitentes; y tienen un factor de planta bajo por lo tanto, los suministros con energía eólica y fotovoltaica para la minería deben ser complementadas con energías convencionales de mayor precio (normalmente la generación marginal es térmica, de mayor precio que el promedio de las energías convencionales). De ahí la importancia que se desarrolle más la tecnología de almacenamiento y se puedan ir adecuando también algunos procesos dentro de la operación minera. Algunos métodos para almacenar grandes cantidades de energía son la tecnología CSP, que concentra la energía solar durante el día para calentar sales fundidas, y entrega calor durante la noche para mantener la continuidad en la operación.

- Los contratos actuales de energía (PPA) en la mayoría de las empresas se realizan a largo plazo, con poca flexibilidad para incorporar energías renovables en cualquier momento del contrato, en la mayoría de los casos, las minas deben esperar hasta el final del contrato para incorporar otro tipo de tecnología.
- También existen otras barreras relacionadas principalmente con los aspectos culturales del sector minero y la falta de capital humano especializado.

A pesar de todo lo anterior, vale la pena mencionar que la minería chilena ha realizado y está progresando significativamente en el uso de las energías renovables. Hay varias formas que las mineras han ido integrando estas energías a las operaciones mineras chilenas, como ejemplo:

- 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 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

En 2019, varias grandes empresas mineras en Chile anunciaron poderosos procesos de renegociación de contratos eléctricos. Algunas minas importantes 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.

La Tabla 2 a continuación contiene información pública disponible tanto en internet como en páginas web de empresas mineras que refleja el interés de la minería chilena por implementar el uso de energías renovables en sus operaciones.

Tabla 2: Resumen de casos de uso de energías renovables en la minería chilena

Minas integrando energías renovables	Proyecto de energías renovables	Tipo de Integración	Descripción
Gabriela Mistral, Codelco	Planta Termo Solar Pampa Elvira	Directo	54 GWh/año; 44.000 Ha calentamiento soluciones, reduciendo 15.000 t CO ₂ ,
Centinela(Ex-El Tesoro), AMSA	Planta Termo Solar	Directo	1.280 colectores cilindricos, para calendar soluciones EW, reduciendo 10.000 t CO ₂ . Primera en construirse en Chile
Los Bronces, Anglo American	Planta Fotovoltaica sobre relaves, Las Tórtolas	Directo	150 MWh/año, 256 paneles fotovoltaicos localizados in una isla flotante sobre depósito de relaves que también reducen la evaporación del agua sobre el area que cubre.
Cerro Dominador	Fotovoltaica y Concentración Solar (CSP)	Directo	100 MW FV; 110 MW CSP; 1.000 ha;
Los Pelambres, AMSA	Planta Fotovoltaica Javiera	PPA	69,5 MW; 180 ha; 15% de necesidades energéticas de los Pelambres
Los Pelambres, AMSA	Planta Fotovoltaica Conejo Solar	PPA	104MW; 260 Ha ~20% necesidades energéticas de los Pelambres
Los Pelambres, AMSA	Parque Eólico, El Arrayán	PPA	122 MW; 280 GWh/año , 70% a los Pelambres, ~20% necesidades energéticas de los Pelambres
Zaldívar, AMSA	Energías Renovables Colbún S.A	PPA 10 años	Contrato proveerá 550 GWh/año: 100% de energía limpia renovable reduciendo 350000 t CO ₂
Antucoya, AMSA	Energías Renovables Engie Energy	PPA 11 años	Contrato proveerá 300 GWh/año, 100% de energía limpia renovable reduciendo 134.000 t CO ₂
Collahuasi	Planta Photovoltaica Pozo Almonte 1,2,3	PPA 20 años	Contrato que provee desde el 2014 25MW ~13% de necesidades energéticas de Collahuasi reduciendo 50000 t CO ₂
Collahuasi	Energías Renovables Enel	PPA 10 años	Contrato proveerá a partir del 2020, 1000 GWh/año 100% de energías renovables, al ~80% de necesidades energéticas de Collahuasi
Quebrada Blanca	Planta Photovoltaica Andes Solar AES Gener	PPA 20 años	Contrato que provee desde el 2013 21 MW, ~ 30 % de necesidades energéticas de Quebrada Blanca
Candelaria	Energías Renovables AES Gener	PPA 18 años	Contrato proveerá a partir del 2023 1.100 GWh/año con energías renovables
BHP Escondida - Spence	Energías Renovables ENEL y Colbún	PPA 10 años ENEL 15 años Colbún	Contrato proveerá 6 TWh anuales, a partir de 2021 y segunda parte en 2022

Minas integrando energías renovables	Proyecto de energías renovables	Tipo de Integración	Descripción
Anglo American	Energías Renovables ENEL	PPA 10 años	Contrato que provee a partir del 2021 3TWh anuales
ENAMI	ACCIONA Energías Renovables y Plantas Fotovoltaicas Conejo Solar y Almeyda	PPA	Contrato que proveerá entre 2018 al 2022 el 100% de las necesidades de electricidad de plantas Enami y el complejo Paipote_Matta con energías renovables.
CAP Group	Planta Photovoltaica Amanecer Solar	PPA	Contrato que provee desde el 2014 100 MW; 250 Ha; ~15% de necesidades energéticas de CAP
Chuquicamata, Codelco	Energías Renovables ENGIE	PPA 11 años	Contrato que proveerá a partir del 2021 comenzando con el 70% de las necesidades de electricidad de operación con energías renovables
Caserones	Energías Renovables ENEL	PPA 17 años	Contrato que proveerá a partir del 2021 el 100% de las necesidades de electricidad de la operación con energías renovables.
Sierra Gorda	Energías Renovables AES GENER	PPA 18 años	Contrato que proveerá a partir del 2023 el 100% de las necesidades de electricidad de las operaciones con energías renovables.
Carmen de Andacollo	Energías Renovables AES GENER	PPA 11 años	Contrato que proveerá entre 2020 al 2031 el 100% de las necesidades de electricidad de la operación con energías renovables.
Cemin	Energías Renovables Engie Energía	PPA 4 años	Contrato que proveerá 1,48 GWh anuales para abastecer las instalaciones de las operaciones de Minera Pullalli, ubicada en La Ligua, región de Valparaíso.

Fuente: Elaboración Cochilco en base a información pública, 2021

3.3.1 Porcentaje de uso de Energías Renovables en Minería del Cobre Chilena

Es importante señalar antes de ver los resultados de esta sección sobre porcentaje de uso de energías renovables atribuibles a la minería del cobre, que 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), por tanto los cálculos expuestos a continuación (obtenidos con información pública) son una

gruesa aproximación a la realidad y así deben ser considerados. La estimación realizada no considera por ejemplo las eventuales restricciones en la transmisión, cuando se producen congestiones en la transmisión, el sistema de transmisión se desacopla, entonces ya no se puede decir que –por ejemplo- las mineras que están en el norte, podrían estar consumiendo electrones que genera la hidro en el sur. También otro caso que puede suceder es que por ejemplo dada las limitaciones actuales de las energías renovables no convencionales (ej. su intermitencia), como por ejemplo en una generación por energía solar, podría ser erróneo asignar el porcentaje de una energía fotovoltaica de la matriz, a una minera que esté operando de noche, aunque también depende del almacenamiento que tenga la planta fotovoltaica, ahora bien como el almacenamiento falta por desarrollarse a nivel mundial, a priori podríamos decir que no se puede asignar 100% esa energía al consumidor nocturno. Según ministerio de energía, el porcentaje de consumo renovable de la minería va a depender mucho de la curva de demanda de la minería respecto de la curva de generación total.

Ahora bien, hecha la advertencia de párrafo anterior, se procede a la estimación de porcentaje de uso de energías renovables en minería del cobre. Como se describió en sección anterior las mineras han ido integrando las energías renovables a sus operaciones mineras chilenas y ya al 2023 como se puede observar en Tabla 3 se espera que el 63% de las necesidades de energía eléctrica de la minería del cobre sean provenientes de fuentes limpias. Esta situación debiera tener similar porcentaje en el año 2025. Cabe señalar que estos contratos que el proveedor ofrece de energías renovables debiera ser certificado. El ministerio de energía está trabajando en certificaciones para que los generadores de electricidad puedan garantizar que la energía suministrada es 100% renovable.

Tabla 3: Porcentaje de potencial uso de Energía Renovable respecto a la demanda total de electricidad de la minería del cobre

	2021	2022	2023
TWh por uso de Energías renovables	14,32	17,6	17,8
TWh Consumo esperado minero del cobre	25,8	26,6	28,3
Porcentaje del Consumo eléctrico Esperado	55,5%	66,1%	62,9%

Fuente: Fuente: Elaboración Cochilco en base a información pública, 2021; Estudio Proyecciones de Energía Minería del Cobre, Cochilco 2020

Estas acciones, junto con algunas otras, como las minas que ya habían invertido para construir su propia fuente de energía renovable, cumplen con los SGD reconocidos mundialmente: "Objetivos de Desarrollo Sostenible", particularmente el ODS N ° 7: "Energía asequible y no contaminante; deja en claro que se debe aumentar el uso de energía limpia y no contaminante, como las energías renovables en diferentes sectores, y que se necesitan inversiones públicas y privadas en energía para esto y también para adoptar nuevas tecnologías". Por lo tanto, la minería chilena del cobre ha realizado acciones concretas para mitigar las emisiones de efecto invernadero y contribuir al desarrollo sostenible del sector y de los compromisos que el país ha adoptado interna e internacionalmente para mitigar el cambio climático.

3.3.2 Uso de Hidrógeno Verde

Hoy la gran mayoría del hidrógeno se produce masivamente a partir de hidrocarburos como por ejemplo el gas natural, carbón, sin embargo este tipo de producción es una fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Otro mecanismo es generar hidrógeno por medio de una la electrólisis del agua (H₂O) dividiendo sus componentes: hidrógeno y oxígeno y liberando el oxígeno a la atmósfera. Ahora bien, si se usan energías renovables para este último mecanismo de generación de hidrógeno, estaríamos hablando de hidrógeno verde, de un proceso limpio, sin producir emisiones.

Chile gracias a su gran potencial solar y eólico, puede convertirse en uno de los productores de hidrógeno verde a menor costo en el mundo. Para ello el país presentó la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en noviembre 2020. Es una política pública de largo plazo al 2050 con un Plan de acción al 2025, liderada por el Ministerio de Energía y su División de Prospectiva para habilitar y promover una economía del Hidrógeno verde y sus derivados como combustibles limpios para una transición energética global.

La visión general es consolidar una economía del hidrógeno verde nacional y de exportación. Aprovechar el potencial de energías renovables de Chile y alcanzar la carbono-neutralidad del país el 2050. Los objetivos generales de la Estrategia son: 1) Acelerar el desarrollo de una industria de hidrógeno verde en Chile 2) Establecer políticas e iniciativas públicas de habilitación y fomento alineadas con privados 3) Promover un desarrollo local sostenible 4) Posicionar al país en el mercado internacional. Dentro de los objetivos estratégicos están: a) Fomentar el uso del hidrogeno verde en reemplazo de combustibles fósiles en transporte, industria y minería para reducir emisiones en 2 Mton CO₂eq al 2030 (10% de la reducción total 2020-2030 comprometida en la NDC de Chile). b) Lograr que Chile

se vuelva un país exportador de hidrógeno verde al 2030. c) Promover creación de empleos, desarrollo de proveedores nacionales, reducción de contaminación local y crecimiento económico sostenible en torno a la industria del hidrógeno verde para generar beneficios a los ciudadanos.

El gobierno también ha estado trabajando en las normas que regirán las instalaciones de hidrógeno y su uso.

En relación al uso de hidrógeno en minería, CORFO ha respaldado tres proyectos con el uso de hidrógeno potenciales usos del hidrógeno verde para reemplazar el diésel (principal combustible usado en minería) en procesos mineros, tales como:

- a) Proyecto de camiones duales (hidrógeno verde-diésel) usado para transporte de carga
- b) Proyecto hidrógeno verde en celdas combustibles sin emisiones para adaptar la operación de cargadores frontales de la minería subterránea de diésel a hidrógeno mediante celdas de combustibles.
- c) Proyecto vehículos mineros (batería-hidrógeno verde) que busca desarrollar módulos de trenes de potencia híbridos que puedan emplearse también en camiones mineros.

También ya hay iniciativas de las faenas mineras para usar hidrógeno verde en otros procesos, como el caso de Minera Spence con su proyecto piloto en electroobtención, que busca generar hidrógeno en reemplazo diésel y gas natural en calderas de agua caliente, Anglo American con un proyecto piloto de hidrógeno en Los Bronces/Las Tórtolas a ejecutarse entre 2021 y 2022 y posible incorporación flota de transporte con Fuel Cell a hidrógeno a partir de 2022, Collahuasi con un estudio de reemplazo de CAEX operados por diésel por hidrógeno. Además la empresa cuenta con un piloto de hidrógeno en estudio para verificar el comportamiento del hidrógeno en el entorno de Collahuasi (4.000 msnm) y Codelco con un estudio de reemplazo de CAEX operados por diésel por hidrogeno verde.

3.3.3 Otras Iniciativas

La electromovilidad es otra iniciativa para reemplazar combustible, un ejemplo de ello son el uso de taxis y buses eléctricos para el traslado de sus trabajadores en diferentes faenas y de equipos en zonas de operación, probando además rutas que tienen ciertas complejidades como por ejemplo caminos con nieve durante el invierno, enfrentando así vehículos eléctricos a condiciones reales de una operación minera con el fin de validar variables tecnológicas, de negocios y de sustentabilidad, además de entender la nueva tecnología e identificar los desafíos para extrapolarla, incorporarla y escalarla otros

procesos. También progresivamente se han ido introduciendo equipos como palas y sistemas de tracción de camiones eléctricos.

IV. COMENTARIOS

La integración de las Energías Renovables en la minería chilena tiene efectos positivos directos principalmente por la disminución del precio de la energía eléctrica y la posibilidad de disminuir el uso de combustibles fósiles, mejorando la sustentabilidad económica y ambiental. En todo caso, el término sustentabilidad en términos energéticos, involucra no sólo el uso de energías limpias sino también un uso eficiente y una gestión de la energía, así que complementando estos aspectos en los procesos mineros sería un gran avance para producir un cobre más verde y sustentable.

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 esta materia es fundamental el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y el Estado con la eficiencia energética, ya que ello permite la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo la sustentabilidad del negocio minero. 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 a que realicen una gestión activa 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 ello se busca promover mejoras continuas y reducción de emisiones.

Al respecto se visualizan algunas oportunidades que en las diferentes etapas del proceso:

Tanto en la minería subterránea como a rajo abierto sería recomendable maximizar el transporte mina-planta por correas y fomentar la electro movilidad en los equipos de carguío y transporte. Un objetivo general sería acercarse al IPCC (in Pit Crushing and Conveying) en la minería a rajo abierto y al continuous mining en la subterránea; en los cuales ha habido grandes progresos en las últimas décadas. Además, avanzar en el mine-to-mill, por la mayor eficiencia energética y la disminución en el tamaño y potencia de los equipos de conminución en la planta.

Las plantas concentradoras tienen el mayor consumo de energía eléctrica; en especial en la conminución; por lo cual la disminución del precio de la electricidad tendría un efecto

positivo directo en los costos. Las fundiciones de concentrados se pueden analizar desde el punto de vista ambiental y energético. Desde el punto ambiental, deben cumplir con las exigencias legales para la recuperación y la concentración en los gases, del material particulado, el azufre, el arsénico y otros contaminantes. Desde el punto de vista energético, los procesos han maximizado el aprovechamiento del calor de las reacciones exotérmicas de azufre y mejorado el balance térmico mediante el uso del oxígeno. Las plantas de aire de soplado, de oxígeno y de ácido serán beneficiadas por la disminución del precio de la energía eléctrica; asimismo, se debe optimizar la recuperación del calor de los gases.

El consumo de energía eléctrica en la electroobtención y en la electrorefinación es por lejos el mayor componente del costo, por lo cual la disminución del precio gracias a las Energías Renovables será de gran beneficio. Un objetivo estratégico para Chile es aumentar el valor agregado del cobre antes de ser exportado; para lo cual se requeriría incrementar la capacidad en fundiciones y refinerías. No es un desafío fácil, pero sería beneficiado por disminución del precio de la energía eléctrica, gracias a las Energías Renovables.

El manejo y depositación de los relaves es uno de los temas de mayor trascendencia para la sostenibilidad de la minería chilena, por el consumo de agua, los riesgos de derrumbes y ambientales, la inexistencia de espacios adecuados para emplazar los depósitos y por las exigencias para el cierre de las minas. En una concentradora casi la totalidad de la pérdida de agua es en los relaves (retenida en el sólido y evaporada) y el agua perdida determina las necesidades de agua de reposición; de aquí la gran importancia de maximizar la recuperación de agua desde los relaves. Por esto, la tendencia es hacia la filtración a presión de los relaves, que disminuye las necesidades de agua de reposición, mitiga los riesgos de derrumbes y de infiltración de agua en las napas subterráneas y facilita la remediación al abandonar los depósitos. El filtrado a presión de los relaves aumenta el consumo energético para el desaguado de los relaves; por lo tanto, una disminución del precio de la energía eléctrica lo favorece. Finalmente, también se sugiere considerar entre los trade-off ubicar las plantas de tratamiento aguas abajo del yacimiento; especialmente, si el yacimiento está a gran altura en las montañas. Normalmente el incremento de la inversión por la construcción de los túneles, movimientos de tierra y sistema de transporte se compensa con el menor costo de inversión al construir la planta a una menor altura sobre el nivel del mar; además, se puede regenerar energía en la correas transportadoras con pendiente descendente; se disminuye la distancia y altura de impulsión en el caso de utilizar agua de mar; ubicar mejores lugares para los depósitos de relaves, mejorar las condiciones de vida y de operación para el personal y disminuir la altura de impulsión en el caso de usar agua de mar.

V. CONCLUSIONES

1. La industria minera enfrenta los desafíos de un intenso y creciente consumo energético, la necesidad de que el suministro sea constante y seguro, el aún alto costo de energía eléctrica, la necesidad de usar energía compatible con el medio ambiente y de reducir las emisiones de gases efecto invernadero del sector. Por lo tanto toda alternativa de ahorro energético y la posibilidad de disminuir el uso de combustibles fósiles, así como usar energías con baja o cero emisión de carbono directamente en sus procesos o indirectamente (de la matriz energética chilena) es y será muy importante para la minería chilena en términos de sustentabilidad y competitividad.
2. El Estado por su parte ha liderado una revolución energética en los últimos años, que ha hecho posible avanzar en mejoras significativas para un escenario energético más eficiente y sustentable en Chile 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. Cabe señalar que todavía hay que resolver temas en relación a la transmisión, por un lado en la construcción de infraestructura de transmisión, que es fundamental para lograr llevar la energía renovables hacia los centros de consumos y por otro lado la congestión en la transmisión (por ejemplo en horas solares), lo que está causando restricciones a las Energías Renovables No Convencionales.
3. Es así como, en Chile ha habido un gran desarrollo de las Energías Renovables y la capacidad de generación de las energías solar y eólica sigue aumentando en forma acelerada, sin embargo su factor de planta sigue siendo bajo, entonces el gran salto será cuando se desarrollen métodos eficientes y económicos de almacenamiento, por otra parte, es predecible que las Energías Renovables se seguirán desarrollando y haciendo más continua su generación.
4. Considerando que el horizonte de los proyectos mineros es entre 20 y 30 años y los contratos de suministro eléctrico (PPAs) son de largo plazo, entonces, sería recomendable que los contratos de suministro eléctrico permitan revisarlos cada cierto tiempo y poder ir integrando Energías Renovables.
5. La disminución gradual de los precios de la energía eléctrica debiera complementarse con la disminución del consumo de combustibles fósiles y el mejoramiento de la eficiencia energética, ya sea mediante el equipamiento, los procesos o los métodos de operación.

6. Hoy existen oportunidades de incorporar Energías Renovables no convencionales en algunos procesos de la minería ya que las tecnologías existen, están disponibles en el mercado y tienen precios competitivos en comparación a otras fuentes. Ahora bien en aquellos procesos mineros que requieren energía eléctrica el uso podría ser directo, sin embargo, dada la intermitencia de la generación con Energías Renovables no convencionales, se dificulta su uso exclusivo, entonces puede que algunos procesos necesiten complementarse con sistemas de almacenamiento, por lo tanto hoy sería más apropiado como un complemento a la energía de la red; en tanto para aquellos procesos donde se requiere energía térmica, esta potencialmente podría ser reemplazada 100% por energía solar térmica, sin embargo hay que hacer procesos de adaptación tecnológica, de lo cual es posible deducir que ello sería más fácil para proyectos nuevos que para faenas ya operando.
7. También otros potenciales usos de Energías Renovables directo en proceso mineros puede ser a futuro utilizar hidrogeno solar en el transporte y la instalación de plantas desaladoras que se alimenten de Energías Renovables tanto para proceso de desalinización como para el bombeo del agua a la faena.
8. Si bien se ha avanzado como país en un marco muy favorable para la colaboración entre Energías Renovables y compañías mineras, aún existen otro tipo de barreras para incorporar estas energías totalmente en la minería chilena, principalmente referidas a aspectos culturales de la minería chilena, seguido por la falta de capital humano especializado y barreras económicas.
9. Sin embargo estos desafíos valen la pena que sean abordados por el país y por la industria minera. Hay identificados diversos beneficios para la industria minera de integrar Energías Renovables, como reducir las emisiones de GEI y al reducir el consumo de combustible fósiles genera beneficios en salud y en el medio ambiente, y al largo plazo de una mayor certidumbre de precios de la energía y beneficios económicos de bajar costos energéticos. Asimismo la integración de Energías Renovables en minería le da valor agregado al cobre, otorgando la posibilidad de producir un cobre más sustentable, acorde a los requerimientos de sustentabilidad del mercado, lo que conlleva una diferenciación en el mercado por un lado y la coherencia con un discurso de una minería sustentable por otro; A su vez, esta integración les permite al sector minero cumplir las exigencias ambientales actuales y futuras del país, de la comunidad y la sociedad, con ello se tiene una mayor licencia social, lo que también trae beneficios reputacionales para la industria.

10. Así es como el desarrollo de Energías Renovables en la minería chilena ha sido gradual. A pesar de todo lo anterior, es importante señalar que la minería chilena ya ha realizado y está progresando significativamente en el uso de Energías Renovables. En 2019, varias grandes empresas mineras en Chile anunciaron importantes procesos de renegociación de contratos eléctricos. Algunas minas importantes han finalizado sus PPA mediante el pago de multas significativas, con el objetivo de iniciar contratos con energías renovables y con precios más convenientes. Estas acciones, junto con algunas otras, como las minas que ya habían invertido para construir su propia fuente de energía renovable, cumplen con los Objetivos de Desarrollo Sustentables (ODS) reconocidos a nivel mundial, particularmente el ODS No. 7: "Energía asequible y no contaminante; deja en claro que se debe aumentar el uso de energía limpia y no contaminante, como las energías renovables en diferentes sectores, y que se necesitan inversiones públicas y privadas en energía para esto y también para adoptar nuevas tecnologías".
11. Por lo tanto, es posible decir que la minería chilena del cobre ha realizado ya acciones concretas para mitigar las emisiones de efecto invernadero y contribuir al desarrollo sostenible del sector y los compromisos que el país ha adoptado interna e internacionalmente para mitigar el cambio climático.
12. En resumen, todos los desafíos mencionados anteriormente valen la pena que sean abordados por el país y por la industria minera. Hay identificados diversos beneficios para la industria minera de integrar Energías Renovables, como reducir las emisiones de GEI y al reducir el consumo de combustible fósiles genera beneficios en salud y en el medio ambiente, y al largo plazo de una mayor certidumbre de precios de la energía y beneficios económicos de bajar costos energéticos. Asimismo la integración de Energías Renovables en minería le da valor agregado al cobre, otorgando la posibilidad de producir un cobre más sustentable, acorde a los requerimientos de sustentabilidad del mercado, lo que conlleva una diferenciación en el mercado por un lado y la coherencia con un discurso de una minería sustentable por otro; A su vez, esta integración les permite al sector minero cumplir las exigencias ambientales actuales y futuras del país, de la comunidad y la sociedad, con ello se tiene una mayor licencia social, lo que también trae beneficios reputacionales para la industria.

VI. REFERENCIAS

1. COCHILCO, 2018, Yearbook Statistics of Copper and Other Minerals 1998-2017.
2. COCHILCO, 2018, Investment in Chilean Mining Portfolio of Projects 2018 - 2027.
3. COCHILCO, 2018, Energy consumption to 2017.
4. COCHILCO, 2018, Mining costs.
5. COCHILCO, 2018, Projection of Energy Consumption 2018-2029.
6. Bravo, Pilar Rivera, Urrutia & Cía (2016). Energy regulation in Chile: overview of reform. Thompson Reuters Practical Law. Available at <https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com>, accessed on December 8, 2017
7. Coordinador Eléctrico Nacional, 2019, <https://www.coordinador.cl/>
8. Ministry of Energy, 2019, Energy efficiency, www.energia.gob.cl/eficiencia-energetica
9. Ministry of Energy, 2019, Transmission Law, <http://www.energia.gob.cl/tema-de-interes/promulgacion-ley-de-transmision>
10. Ministry of Energy, 2015, Energy Policy 2050, http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf
11. Ministry of Energy, 2018, Energy Roadmap 2018 -2022, <http://www.energia.gob.cl/tema-de-interes/gobierno-lanza-ruta-energetica-0>
12. Ministry of Energy, 2017, Greenhouse gas mitigation plan for the energy sector http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/plan_de_mitigacion_energia.pdf
13. Chile Agenda 2030, 2019, <http://www.chileagenda2030.gob.cl/seguimiento/ods-17>
14. Ministry of Energy, 2019, Renewables Energies, <http://www.energia.gob.cl/energias-renovables>
15. Ministry of Energy, 2019, Decarbonization Working Table <http://www.energia.gob.cl/pagina-mesas/405>
16. Generators of Chile, Non-conventional Renewable Energies in Chile, 2019, <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-solar>
17. Chilean Mining Magazine, 2018, Report: "Energy puzzle of mining " <http://www.mch.cl/reportajes/puzle-energetico-la-mineria/>
18. Vega, D., 2014, Desarrollo de la Energía Mareomotriz en Chile, Convenio de Colaboración y Transferencia de Recursos entre la Subsecretaría de Energía y la Universidad de Chile.
19. Use of Hydrogen for transport and fuel cells, 2019, Corfo
20. Antofagasta Minerals, 2019, www.antofagastaminerals.cl
21. Reporte sostenible, Antucoya Article, 2019, <http://reportesostenible.cl/Minera-Antucoya-utilizara-solo-energia-renovable-a-contar-del-2022>

Trabajo elaborado en

División de Estudios y Políticas Públicas
Comisión Chilena del Cobre

Rosana Brantes Abarca

Analista Senior, COCHILCO

Fernando Pino

Consultor Independiente, Chile

Jorge Cantallopts

Director División de Estudios y Políticas Públicas

Julio 2021