

Estudio

OPORTUNIDADES DE NEGOCIO PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LA MINERÍA CHILENA

Informe Final

Septiembre, 2022



CENTRO NACIONAL DE PILOTAJE
DE TECNOLOGÍAS PARA LA MINERÍA



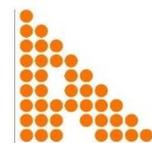
UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

phibrand

Patrocinan:

 **Fraunhofer**


ALTALEY


APRIMIN

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

 **expande**
Impulsando soluciones para
la minería del futuro

 **EcoDesarrollo**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
CONTEXTO	7
Transición Energética en Minería	9
OBJETIVOS.....	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos.....	23
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	24
Diagnóstico	24
Levantamiento de información cualitativa	24
Muestra	25
Análisis y resultados	26
RESULTADOS	28
1. ESTRATEGIAS DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA DE LAS COMPAÑÍAS MINERAS	28
1.1 Matriz energética dominada por tecnologías limpias: contratos eléctricos PPA (Power Purchase Agreements)	28
1.2 Electromovilidad.....	30
2. NICHOS EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA A CORTO Y MEDIANO PLAZO	34
2.1 Fabricación y reconversión de equipos para transporte de personal.....	36
2.2 Reconversión de equipos medianos a eléctricos.....	45
2.3 Reconversión de equipos medianos a combustibles sintéticos	51
2.4 Mantenimiento y reparación de equipos pequeños y medianos	57
3. BARRERAS PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA A CORTO Y MEDIANO PLAZO.....	61
3.1 Barreras técnicas.....	62
3.2 Barreras económicas	66
3.3 Barreras humanas	69
IV. TRANSICIÓN ENERGÉTICA A LARGO PLAZO (2027)	71
4.1 Camiones CAEX.....	71
4.2 Hidrógeno Verde.....	77
CONCLUSIONES	83
ANEXOS.....	85

PRESENTACIÓN

Este documento contiene los resultados de una investigación orientada a identificar oportunidades de negocio en el mercado de la transición energética en la minería chilena. El estudio fue solicitado por el Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la Minería (CNP), corporación público-privada apoyada por Corfo, que entrega servicios de alta especialización técnica en pilotaje y validación industrial de tecnologías aplicando metodologías de medición y protocolos de ejecución. El propósito de CNP es potenciar y fortalecer el desarrollo tecnológico para la minería mediante la realización de pilotajes que permitan validar productos y procesos innovadores, bajo condiciones controladas, reduciendo el riesgo de la adopción tecnológica temprana.

Phibrand, por otro lado, es una consultora dedicada a la innovación e investigación socioeconómica, con foco en mercados industriales, inteligencia de mercado, B2B, emprendimiento y aceleramiento comercial. Su objetivo principal es mejorar la eficiencia y la competitividad de los diferentes sectores industriales, eliminando sus asimetrías de información y mejorando la relación entre los distintos actores de cada industria.

El informe consiste en la identificación de estrategias de transición energética de las compañías mineras, así como en la identificación y cuantificación de nichos en la transición energética a corto y mediano plazo que permita construir y entregar información pública al ecosistema minero sobre la probabilidad de cambio tecnológico y las oportunidades de negocio en el ámbito de la transición energética. En ese sentido, se entregará un panorama actual de las oportunidades de negocio en el corto y mediano plazo vinculado directamente a los escenarios y probabilidades recogidos de las estrategias de las compañías mineras y evaluación de expertos. Por último, se caracterizarán los nichos relevantes en la transición energética a largo plazo y el hidrógeno verde como vector energético.

Para el análisis se utilizaron datos de fuentes secundarias, entrevistas con *stakeholders* clave, representantes de áreas operacionales, energía e innovación de las compañías mineras y con proveedores de equipos de la minería.

INTRODUCCIÓN

La lucha contra el cambio climático es un desafío de carácter global. Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera crecen cada año¹, por lo que uno de los mayores desafíos de desarrollo en la actualidad, es la transición energética. En ese sentido, acelerar la acción climática es una causa transversal de los generadores de energía, sectores productivos y consumidores de energía. Actualmente, se reconocen dos grandes herramientas para abordar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): la eficiencia energética (EE) y contar con una matriz energética de fuentes limpias y renovables².

La energía es un elemento base y fundamental para el logro de la carbono neutralidad de Chile al 2050, ya que es el sector con mayor emisión de gases de efecto invernadero en el país, responsable del 77% de las emisiones totales en el año 2018, pero que a su vez tiene el mayor potencial de mitigación de emisiones³. La transición energética que vive el país contempla: la incorporación masiva de energías renovables, el retiro voluntario de centrales termoeléctricas a carbón, la eficiencia energética, la electromovilidad y la incorporación de hidrógeno verde y la gestión del litio, como piedras angulares.

La transición energética implica el reto de reemplazar combustibles fósiles por otras alternativas energéticas en minería. Sin embargo, hay información insuficiente o una escasa divulgación de la misma acerca de las características de las instalaciones, costos y desafíos desde la planificación a la operación, lo cual limita las posibilidades de demostrar los beneficios de la tecnología a un público amplio y aumentar el número de empresas interesadas en desarrollar e implementarla. A pesar de las iniciativas existentes en el país, aún se presentan desafíos que es necesario abordar colaborativamente entre todos los sectores: público, privado y académico para acelerar el progreso en esta materia.

Una de las propuestas que se ha planteado es el uso del hidrógeno (H₂) como vector energético puede ser una alternativa concreta para avanzar en la carbono neutralidad⁴. En torno a ello, la situación de Chile vinculada a la industria minera abre oportunidades específicas para la integración de las tecnologías de hidrógeno en el sector. Disminuir las emisiones de una industria clave para Chile, como la minería, es un desafío que hoy se puede enfrentar

¹ National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Obtenido de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>

² Confederación de la Producción y del Comercio (CPC) & EY. (2020). Visión y Acción climática del mundo empresarial para Chile. Obtenido de https://www.ey.com/es_cl/comision-cop25/informe-cpc-ey

³ Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (2021). Camino a la carbono neutralidad y resiliencia a más tardar al 2050. Obtenido de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/>

⁴ Confederación de la Producción y del Comercio (CPC) & EY. (2020). Visión y Acción climática del mundo empresarial para Chile. Obtenido de https://www.ey.com/es_cl/comision-cop25/informe-cpc-ey

considerando al hidrógeno verde como una oportunidad que podría contribuir a que el país exporte cobre con una menor huella de carbono.

Sin embargo, como se verá más adelante, empresas, proveedores y expertos perciben la implementación del hidrógeno verde en operaciones mineras como un escenario de largo plazo. No obstante, se muestran interesadas en avanzar en la implementación de otras tecnologías que son visualizadas en un horizonte temporal más cercano, enfatizando la relevancia de aspectos comerciales y técnicos que son relevantes para desarrollar estas estrategias. Este estudio analiza la transición energética y las oportunidades de negocio en este contexto, dando cuenta de los nichos relevantes para ser desarrollados por las empresas a corto, mediano y largo plazo, aproximando un Roadmap de esta transición y las barreras existentes.

CONTEXTO

En la Agenda 2030, las Naciones Unidas mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) entrega luces importantes para orientar acciones hacia la transición energética. El ODS7 “Energía Asequible y No Contaminante” es un lineamiento fundamental en la definición de las trayectorias hacia la carbono neutralidad consistente con un desarrollo sostenible. El ODS7 plantea para el 2030 las siguientes metas⁵:

- Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
- Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia.
- Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo.

En relación a ello, en la COP 21⁶ se firmó el Acuerdo de París, cuyo principal objetivo es mantener “el aumento de la temperatura global en este siglo por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5°C”⁷. Chile firmó este acuerdo, lo que implica realizar grandes esfuerzos como país.

Respecto a las acciones necesarias de adaptación para un Chile Carbono Neutral 2050, este cuenta actualmente con la Estrategia de Largo Plazo de Chile (ELPC) actualizada en Octubre del 2021. Este es el instrumento orientador de la política climática para alinearla con la visión y meta de largo plazo definida para Chile y propuesta en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático, que establece donde se debe llegar hacia mediados de siglo para ser coherentes con los esfuerzos mundiales de evitar el aumento de temperatura global tal como establece el Acuerdo de París. Chile se ha comprometido a alcanzar la neutralidad de emisiones de GEI y aumentar su resiliencia a más tardar al 2050, lo que requiere de un esfuerzo de coordinación y sinergia en materia de política ambiental⁸.

⁵Clerc, J. (2020). Trayectoria del Sector Energía hacia la Carbono Neutralidad en el contexto del ODS7. Informe final. Estudio realizado por Energy 2 Business para Generadoras de Chile.

⁶ Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizada en 2015 en París, Francia.

⁷ONU. (2019). Cambio Climático. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.

⁸Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (2021). Camino a la carbono neutralidad y resiliencia a más tardar al 2050. Obtenido de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/>

En ese sentido, el Ministerio de Energía tiene la mayor participación en el diseño e implementación de medidas de mitigación para lograr estos objetivos. La integración y articulación de estas medidas se lleva a cabo a través del establecimiento de instrumentos de política pública de largo plazo liderados por el Ministerio de Energía, como son la Política Energética Nacional, que ha contemplado la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) y los mecanismos regulatorios de Planificación Energética de Largo Plazo (PELP), nutridos tanto por las estrategias de desarrollo definidas para el hidrógeno verde, la electromovilidad, la transición energética de usos a nivel residencial, y aquellas leyes y programas con impacto directo en el cumplimiento de las metas de carbono neutralidad como es la Ley de Eficiencia Energética, entre otros. A continuación, se presentan objetivos sectoriales de largo plazo en torno a la transición energética en el país⁹:

- **Objetivo 1:** Alcanzar una matriz energética baja en carbono al 2050.
- **Objetivo 2:** Establecer la eficiencia energética como pilar de desarrollo en sectores industrial, residencial, entre otros. Eficiencia energética como acción habilitadora fundamental para la descarbonización.
- **Objetivo 3:** Incrementar el uso de tecnologías y energéticos bajos en emisiones, como por ejemplo el uso de hidrógeno verde, en todos los sectores de la economía
- **Objetivo 4:** Lograr el acceso equitativo a servicios energéticos de calidad que permitan satisfacer las necesidades energéticas de las personas y contribuir al desarrollo humano.
- **Objetivo 5:** Descentralización y diversificación de los recursos energéticos para un sector energético más resiliente y bajo en emisiones, incluyendo tanto el autoconsumo de energía como las tecnologías renovables de gran escala.
- **Objetivo 6:** Reducir la vulnerabilidad al cambio climático y facilitar su integración en el desarrollo y gestión del sector energía.
- **Objetivo 7:** Diseñar y promover el uso de instrumentos económicos, incorporando mejoras en los existentes, para acelerar la transición energética en línea con los objetivos climáticos y lo que mandata la ciencia.

La transición hacia la carbono neutralidad ofrece oportunidades económicas, ambientales y sociales relevantes. Sin embargo, a pesar de que Chile se ha comprometido a ser carbono neutral a 2050, como lo exige el Acuerdo de París, en el ranking que evalúa la eficacia de los compromisos somos considerados “insuficientes”¹⁰. Para contribuir al logro de estos objetivos, del sector energía requiere de múltiples alternativas para descarbonizarse a costos competitivos.

⁹Idem

¹⁰ Climate Action Tracker. (2019). Chile. Obtenido de <https://climateactiontracker.org/countries/chile/>.

Transición Energética en Minería

A diferencia de otros sectores que ya cuentan con planes de adaptación específicos de carácter oficial para enfrentar el cambio climático, para minería aún no se han elaborado. En este contexto, las nuevas medidas de adaptación contempladas para el sector han surgido como iniciativas de las propias empresas mineras o bien son de carácter colectivo con participación de empresas, de organismos públicos y centros de investigación. Para avanzar en el desafío de enfrentar el cambio climático, esto es, lograr las medidas de adaptación y mitigación que han sido reconocidas por la gran, mediana y pequeña minería, la industria ha definido ciertas condiciones habilitantes¹¹. Se han identificado las líneas de acción necesarias para contribuir con esta estrategia¹², que implican aspectos técnicos, capacitación, el desarrollo de una normativa en que guíe el actuar de las empresas hacia la sustentabilidad, el desarrollo de políticas estatales y colaboración público-privado para generar una industria local, el compromiso de parte de la industria a través de la construcción de una hoja de ruta tecnológica para la adopción de energías renovables¹³.

A diferencia de otras industrias que pueden cambiar de lugar ante riesgos climáticos, la minería está condicionada a operar donde se encuentran los recursos. Bajo este contexto, la adaptación debe ser un eje principal, sobre todo para un sector vulnerable al cambio climático. Aquello se debe a que la minería se ubica en geografías complejas, posee activos con extensos periodos de vida útil, forma parte de cadenas de suministros globales y necesita recursos que son vulnerables a la variabilidad climática, como el agua y la energía¹⁴.

Un clima cambiante podría afectar la estabilidad y efectividad de la infraestructura y equipamiento de la minería. La mayoría de las instalaciones fueron diseñadas y construidas asumiendo que el clima se mantendría constante, por lo que las construcciones, la estabilidad de las laderas y los tranques de relaves podrían verse afectados ante una futura variación del clima¹⁵. Adicionalmente, se pueden generar problemas en los puertos o rutas de acceso, retrasando el proceso productivo y la cadena de suministro, es decir, afectando la cadena de valor. La ocurrencia de eventos climáticos extremos interrumpen las operaciones, provocando pérdidas financieras. Por ejemplo, los eventos de enero de 2019 (frente de mal tiempo que

¹¹Confederación de la Producción y del Comercio (CPC) & EY. (2020). Visión y Acción climática del mundo empresarial para Chile. Obtenido de https://www.ey.com/es_cl/comision-cop25/informe-cpc-ey

¹²Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineri%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

¹³ Mitchell, B. P. (2019). Will electrification spark the next wave of mining innovation? Obtenido de https://www.ey.com/en_us/mining-metals/will-electrification-spark-the-next-wave-of-mining-innovation.

¹⁴ International Council on Mining & Metals. (2013). Adapting to a Changing Climate: Implications for the Mining and Metals Industry. Climate Change.

¹⁵ Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., Berrang-Ford, L., Smit, B. (2011). Climate Change and Mining in Canada. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 16(3), 347–368

afectó al norte del país) generaron una caída de un 5,1% de la producción nacional de cobre durante el primer trimestre del 2019 en comparación al mismo periodo de 2018¹⁶.

Si bien en Chile, el sector energía es responsable del 78% de las emisiones de GEI, lo que corresponde a 87.136 kt CO₂ eq¹⁷, la minería es un motor clave de la actividad económica de Chile y representa un ámbito crítico para la carbono neutralidad. Cabe destacar que la industria minera es responsable de tres tipos de emisiones:

- Emisiones de alcance 1 (directas), que en el caso de la minería corresponden a la quema de combustibles fósiles.
- Emisiones de alcance 2 (indirectas), que son las que se generan en la producción de la electricidad que consume el sector.
- Emisiones de alcance 3, que consideran al resto de las emisiones indirectas, como las asociadas a los insumos, proveedores y de los procesos posteriores a que el cobre salga de la planta.

En ese sentido, la minería es intensiva tanto en emisiones directas como indirectas; demanda un 33% de la electricidad y casi un 20% del diésel nacional¹⁸. Además, los yacimientos se encuentran cada vez más profundos, con leyes decrecientes y con mayor dureza de la roca, por lo que el consumo energético aumentará¹⁹. Por otro lado, las minas a rajo abierto se irán profundizando, requiriendo mover más material estéril por tonelada de material tratado y a una mayor distancia, aumentando el uso de diésel. Además, se proyecta un crecimiento de la industria minera, lo cual aumentaría el consumo de electricidad en un 41,2% al 2029²⁰.

Respecto al consumo de combustibles, Cochilco²¹ analiza información referente a la evolución interanual de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el periodo 2001-2020, tal como se muestra en la Figura 1. Durante el año 2020 alcanzó los 84.300 TJ, registrando así una leve disminución del 1,8% respecto al 2019, y comparado con el 2001 se registró un aumento del 116,4%. 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.

¹⁶ COCHILCO. (2020). Producción cobre de mina por empresa (mensual). Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Producción-Minera.aspx>

¹⁷ Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático.

¹⁸ COCHILCO. (2018). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017

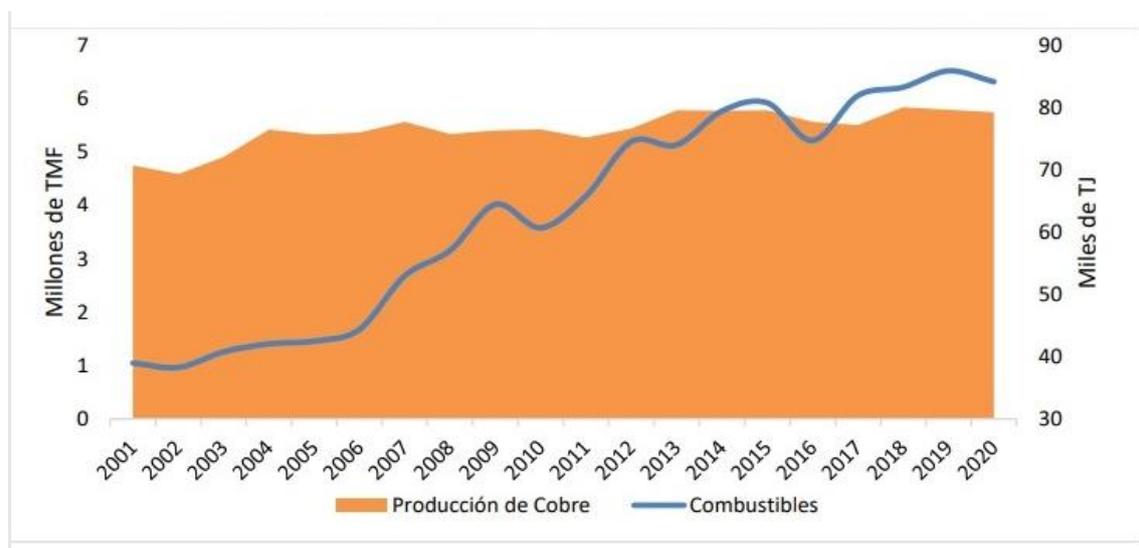
¹⁹ Fundación Chile. (2016). Desde el Cobre a la Innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035. Santiago

²⁰ Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineria%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

²¹ Cochilco (2021). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020. Obtenido de:

<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%2020.pdf>

Figura 1. Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 – 2020

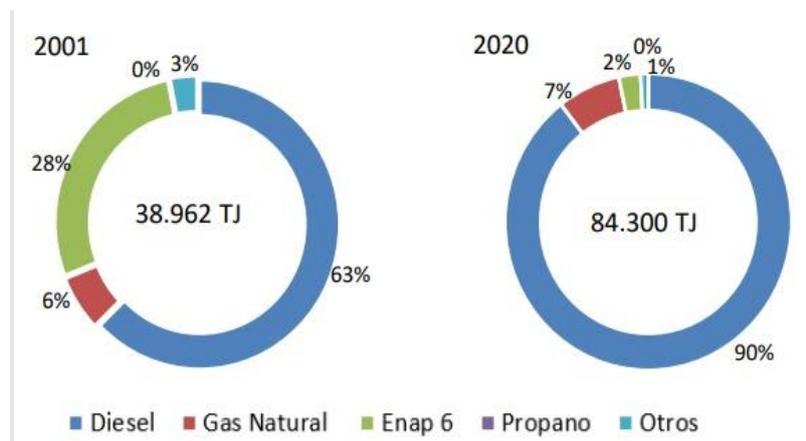


Fuente: Cochilco 2021

Por otro lado, la Figura 2 presenta los cambios de la matriz de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (90% del total durante 2020 versus un 63% en 2001) ha ganado conforme evolucionan las operaciones mineras. Paralelamente, otros combustibles han ido perdiendo progresivamente su usabilidad, destacando el caso del Enap 6, el cual el año 2001 representaba un 27,9% de la cartera de combustibles consumidos, pero para el año 2020 sólo representó un 2% 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 combustibles²².

²² Ídem

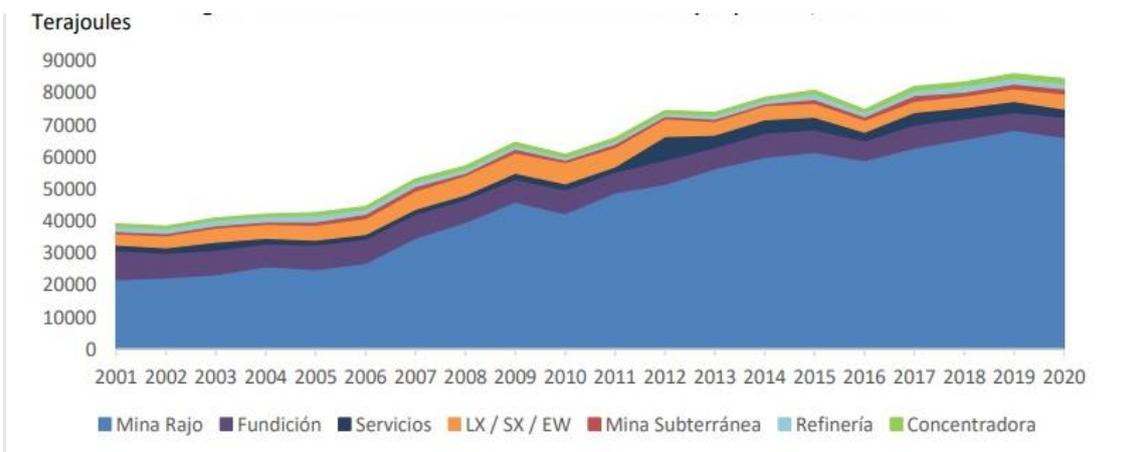
Figura 2. Participación de combustibles en el consumo total de combustibles, 2001 y 2020



Fuente: Cochilco 2021

Respecto al consumo por procesos, tal como muestra la figura 3, el que mayor combustible demanda es la mina rajo (78,4% del total de combustibles usados en minería) y al ver su evolución en el tiempo en los últimos 17 años, el consumo de combustible se ha triplicado prácticamente de 21.664 TJ en 2001 a 66.081 TJ en 2020. Esto se explica por un lado, por el incremento del 21 % de la producción de cobre entre 2001-2020 lo que conlleva un mayor procesamiento de mineral. Por otro lado, como ya se mencionó, debido a temas estructurales que enfrenta la minería como el decrecimiento en las leyes de las minas lo que involucra una mayor cantidad de mineral a transportar para sostener un volumen de producción y también al envejecimiento de los yacimientos, lo que implica, mayor profundidad de excavación y por tanto mayores distancias de acarreo del mineral desde su extracción hasta su procesamiento.

Figura 3. Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2020

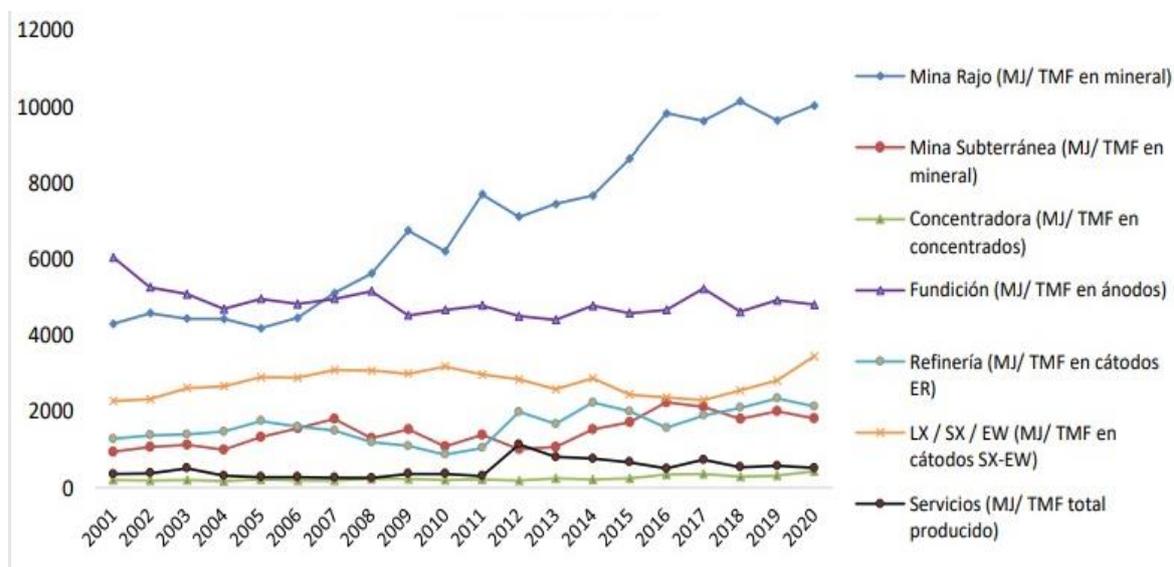


Fuente: Cochilco 2021

A su vez, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles que representa un 7,4% del total de combustibles usados en minería el 2020, disminuyó en un 31,8% entre el 2001 al 2020 aun cuando su nivel de procesamiento se ha mantenido en el período analizado. Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha mantenido con participaciones anuales inferiores al 6 % en cada proceso²³.

Por último, la Figura 4 ilustra los consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido. Se destaca el proceso de mina rajo, proceso ha crecido en prácticamente todos los años, pasando de 4.308 MJ/TMF en 2001 a 9.996 en 2020 (+132,0%). 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 4.813 MJ/TMF (- 20,6%) entre 2001-2020.

Figura 4. Consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF), 2001-2020

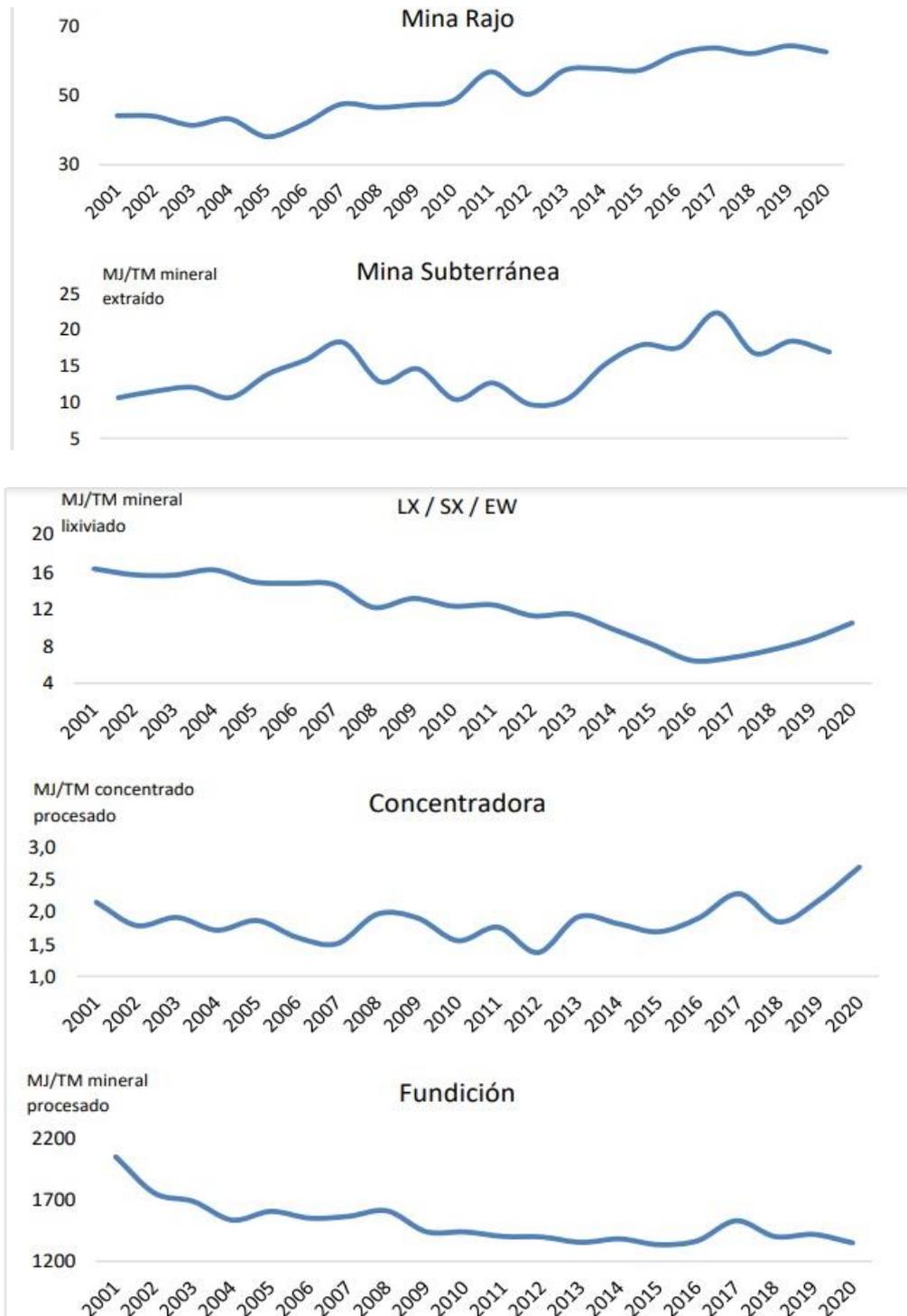


Fuente: Cochilco 2021

Al analizar el uso de combustible en la mina rajo respecto del mineral extraído (Figura 5), el promedio ponderado país se incrementa en 41,3% entre el 2001 al 2020 de 44,2 MJ a 62,4 MJ por tonelada de mineral extraído. Esto se debe, por una parte, a que las leyes promedio de los minerales extraídos han disminuido con los años, lo que implica que para obtener la misma cantidad de fino sea necesario extraer más mineral. Por otro lado, en la década del 2000 entraron en operación diferentes minas rajo abierto, con el consiguiente aumento de consumo de combustibles.

²³ ídem

Figura 5. Consumos unitarios de combustibles por tonelada de material procesado, 2001-2020



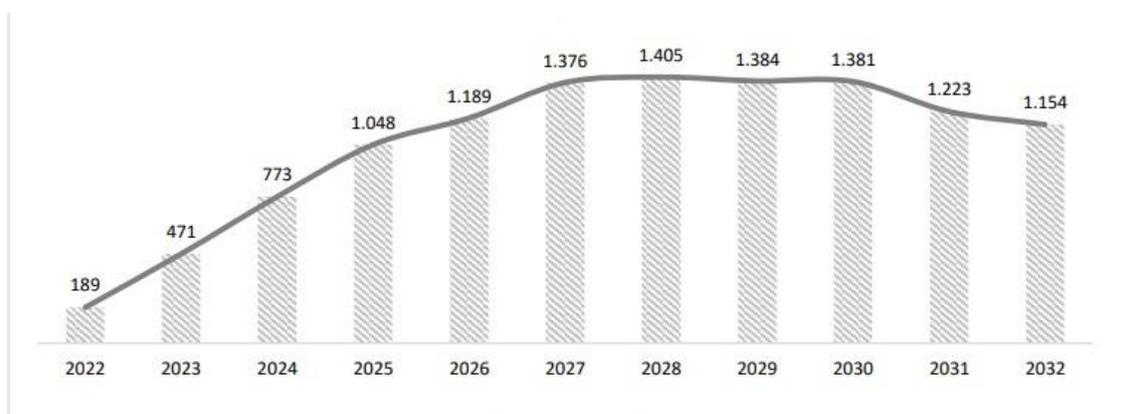
Fuente: Cochilco 2021

En la Figura 5 también destaca, que 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 aire²⁴, teniendo así una disminución entre el 2001 al 2020 del 34,17%, de 2.046 a 1.349 MJ/TM concentrado procesado, por otro lado en el proceso de Lixiviación ha disminuido de 16 a 9 MJ/ TM mineral lixiviado (-35,7%), lo que es indicativo de mejoras operacionales o de gestión.

Por otro lado, en relación a la demanda acumulada de potencia eléctrica, según proyecciones de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco)²⁵, la demanda acumulada de potencia eléctrica requerida para satisfacer el consumo eléctrico esperado de la minería del cobre durante el período 2022-2032 será creciente hasta el año 2028, disminuyendo levemente a partir de entonces²⁶. Aquello requerirá agregar una capacidad de generación eléctrica de 1.154 MW hacia el año 2032, tal como se ilustra en la Figura 6:

Figura 6. Proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica (MW) requerida por la minería del cobre 2022-2032



Fuente: Cochilco 2022

Respecto a la proyección regional, la Figura 7 muestra la participación regional del consumo energético en los años 2021 y 2032, donde se observa que Antofagasta es la región que más consume energía eléctrica, concentrando al 2021 más de la mitad del uso de energía (59%), con 15,3 TWh, porcentaje que se espera que caiga hasta un 52% hacia el 2032. Le siguen las regiones de Atacama con 2,6 TWh (10%), que crecería hasta 4,6 TWh al 2032 (13%); Tarapacá

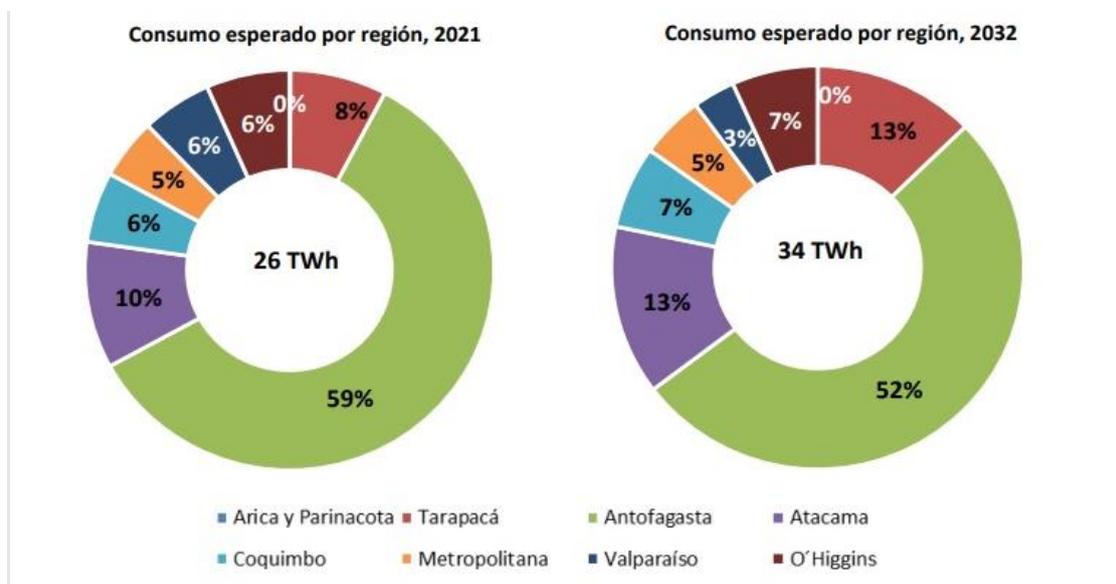
²⁴ ídem

²⁵ COCHILCO (2022). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2021-2032. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyeccion%20Consumo%20EE%202021-2032.pdf>

²⁶ El estudio realizado por Cochilco proyecta el consumo eléctrico de la minería del cobre en el período 2021-2032 en base a: i) la cartera de proyectos y operaciones mineras vigentes, ii) la proyección de producción de los proyectos futuros de cobre y iii) la operación actual y la entrada en operación de las plantas de desalación e impulsión de agua de mar. Asimismo, dada la incertidumbre asociada a la producción, las estimaciones de consumo eléctrico se construyen en base a 3 escenarios: esperado, máximo y mínimo (Cochilco, 2022).

con 2,0 TWh (8%), que crecería a 4,3 TWh al 2032 (13%); O'Higgins con 1,7 TWh (6%), que se mantendría en torno a 2,3 TWh al 2032 (7%) y Coquimbo, que incrementaría su consumo desde 1,5 TWh (6%) a 2,2 TWh (7%) durante el periodo²⁷:

Figura 7. Consumo eléctrico esperado por región en la minería del cobre, 2021 y 2032



Fuente: Cochilco 2022

Según estimaciones de Cochilco y del Coordinador Eléctrico Nacional²⁸, a partir de las proyecciones de demanda eléctrica de la minería del cobre respecto del consumo eléctrico nacional, la primera fluctuaría de 35% en 2021 a un máximo de 39% en 2027, bajando levemente a 34% en 2032, con un promedio del 37% entre 2021-2032. Esta tasa de participación es significativamente mayor en regiones con una industria minera prevalente: Antofagasta concentra el 87% del consumo agregado en la región en los años 2021 y 2032, mientras que en la Región Metropolitana solo representa el 6% del total en ambos años.²⁹

Para analizar el consumo eléctrico, Cochilco divide la minería del cobre en ocho procesos intensivos en energía eléctrica: uso de agua de mar (desalación y/o impulsión), minería subterránea, minería a rajo abierto, lixiviación, extracción por solventes, electrowinning (LX-SX-EW), concentradora, fundición, refinera y servicios. Cada uno de estos procesos emplea cantidades diferentes de energía y las proyecciones se basan en 2 supuestos: 1) que no habría cambios tecnológicos disruptivos en minería que incidan significativamente en los procesos

²⁷ Ídem

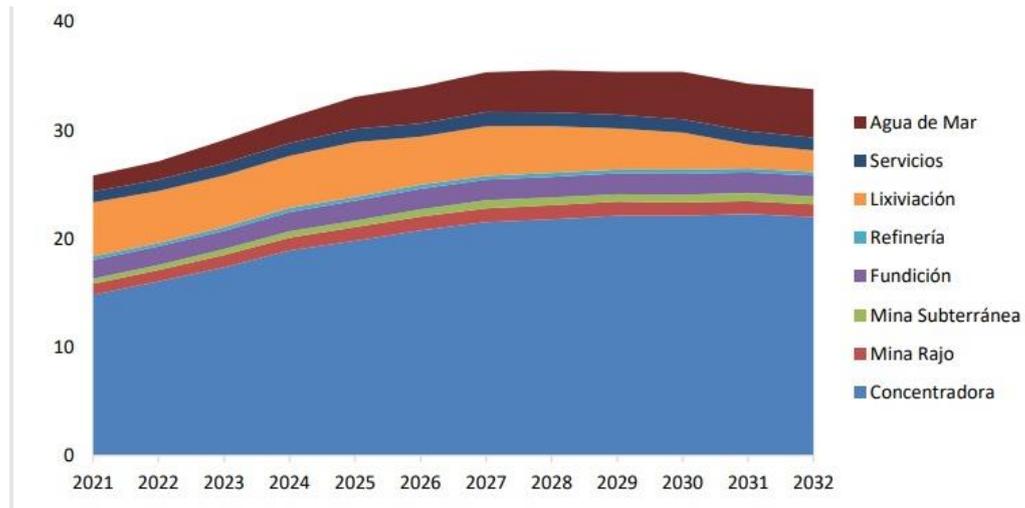
²⁸ Coordinador Eléctrico Nacional (2021). Informe preliminar de Previsión de Demanda 2021-2041. Sistema Eléctrico Nacional y Sistemas Medianos. Obtenido de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2021/12/Informe-Preliminar-Prevision-de-Demanda-2021-2041.pdf>

²⁹ COCHILCO (2022). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2021-2032. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyeccion%20Consumo%20EE%202021-2032.pdf>

mineros y 2) que el consumo de energía eléctrica por procesos crecerá en el tiempo debido al envejecimiento de las mineras y a menores leyes del mineral.

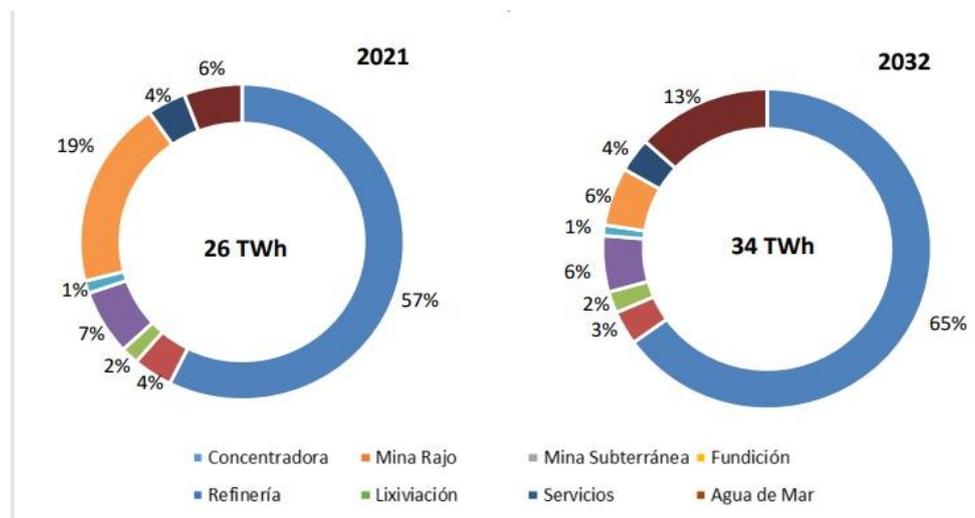
Las proyecciones del consumo eléctrico esperado por proceso se muestran en la Figura 8 y en la figura 9 se ilustra la participación porcentual del consumo de cada proceso específicamente en los años 2021 y 2032³⁰:

Figura 8. Consumo eléctrico esperado (TWh) de la minería del cobre a nivel nacional por procesos 2021-3032



Fuente: Cochilco 2022

Figura 9. Consumo eléctrico esperado (%) de la minería del cobre a nivel nacional por procesos 2021 y 3032



Fuente: Cochilco 2022

³⁰ ídem

Cochilco estima que el mayor consumo de energía eléctrica para el 2021 provendrá de la concentradora con 14,8 TWh, lo que representa el 57,4 % de la energía eléctrica demandada. Hacia el 2032, la demanda de electricidad de este proceso se incrementará llegando a 22,0 TWh, representando el 65,1%. Esto se debe a que gran parte de los proyectos de expansión y nuevos están enfocados en la obtención de concentrados de cobre y también debido a las menores leyes, lo que implica que haya una mayor cantidad de mineral a procesar³¹. En ese sentido, se espera que la producción de concentrados (considerando aquellos procesados internamente como aquellos exportados) aumente desde 4,31 millones de toneladas en 2021 a 6,39 millones de toneladas en 2031, lo que se traduce en un incremento del 49,7%.

Vinculado al incremento de la participación de la concentradora se cuenta el declive en la producción esperada de cátodos SX-EW, lo que se refleja en que los procesos de lixiviación experimentarán una caída desde 5,0 TWh en 2021 a 2,0 TWh en 2032, pasando de representar un 19,3% a un 5,9% del total al final del periodo de estudio. Lo anterior obedece a que la producción esperada de cátodos SX-EW decrecería en el período dado el progresivo agotamiento de óxidos de cobre y el consecuente cierre de operaciones hidrometalúrgicas³².

El proceso de fundición no experimentará un cambio significativo, fluctuando entre un consumo esperado de 1,7 TWh en 2021 (6,6% del total) a 2,0 TWh (5,7%) hacia el fin del periodo. En general hay estabilidad en la producción de las principales fundiciones del país con la excepción de la posible entrada en operación hacia el 2023 del proyecto de modernización de la fundición Hernán Videla Lira llamado Nueva Paipote. Cabe señalar que si bien se observa un cambio en la estructura productiva de cobre en Chile (mayor producción de concentrados versus una menor producción de cátodos SX-EW), no es esperable que esto se traduzca en un aumento similar en la producción de las fundiciones en tanto que no hay planes concretos para una expansión significativa de capacidad.

Por último, los procesos de mina subterránea, refinera y servicios se mantendrán con participaciones relativamente marginales, con ninguno sobrepasando el 2% del consumo eléctrico esperado durante todo el periodo de estudio.

Por otra parte, un ítem que ha tenido y seguirá cobrando una importancia creciente en el consumo eléctrico en el norte del país es el uso de agua de mar, lo que conlleva la desalinización y especialmente la impulsión del agua a las faenas mineras. Esto responde al aumento de operaciones de concentración, proceso altamente intensivo en el uso de agua, insumo particularmente escaso en Antofagasta y Atacama. En efecto, COCHILCO en su estudio de "Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2021-2031" estima que el consumo de agua de mar prácticamente se duplicaría entre 2021 y 2032, pasando de un consumo estimado de agua de mar de 5,7 m³ /s a 14,2 m³ /s⁵. A partir de lo anterior, se espera que el consumo eléctrico requerido para desalación e impulsión de agua de mar se triplique, pasando de un consumo eléctrico estimado de 1,5 TWh en 2021 a 4,5 TWh en 2032. Con esto, se

³¹ ídem

³² ídem

proyecta que a fines del periodo la impulsión y desalación de agua de mar será el proceso de mayor intensidad en consumo energético después de la Concentradora, con un 13,3% del total.

Por otro lado, según las estimaciones realizadas por Cochilco³³, las mineras chilenas han ido integrando las energías renovables y se observa un creciente uso de las mismas, pasando en 2021 de 11,4 TWh –lo que representa el 44% de las necesidades de energía eléctrica de la minería del cobre-, a 20,6 TWh en 2025 que representarán el 62% de la demanda eléctrica de la minería del cobre proveniente de fuentes limpias- (Tabla 1). Actualmente, el Ministerio de Energía está trabajando en certificaciones para que los generadores de electricidad puedan garantizar que la energía que suministran es 100% renovable, ya que los contratos que el proveedor ofrece deberían ser certificados:

Tabla 1. Porcentaje de potencial uso de Energía Renovable respecto a la demanda total de electricidad de la minería del cobre

Consumo electricidad (TWh)	2021	2022	2023	2024	2025
Consumo esperado minería del cobre	25,8	27,1	29,1	31,2	33,1
Por uso de energías renovables	11,38	16,07	18,60	19,73	20,59
Porcentaje de potencial uso de energías renovables	44%	59,2%	63%	63,3%	62,3%

Fuente: Cochilco 2022

Las acciones que han llevado a cabo las mineras cumplen con los "Objetivos de Desarrollo Sostenible", particularmente el ODS7: "Energía Asequible y No Contaminante", lo cual da cuenta de que el sector está trabajando para mitigar las emisiones de GEI, contribuir al desarrollo sostenible y cumplir con los compromisos que el país ha adoptado a nivel internacional para mitigar el cambio climático. Las principales medidas que se han impulsado son la transformación de la matriz energética y la electromovilidad³⁴. La transición hacia una matriz energética dominada por tecnologías limpias se espera que sea mucho más intensiva en uso de minerales que la generación de electricidad en base a energías fósiles. En torno a ello y con miras a resolver una parte importante del compromiso de disminución de GEI, en los últimos años se han llevado a cabo algunas iniciativas, tales como el cambio de contratos de suministro de energía (PPA), el cobre verde (cambio en los estándares de producción y comercialización del mineral que garanticen sustentabilidad), el sello The Cooper Mark de la ICA, inspirada en los objetivos de desarrollo sustentable de la ONU, entre otras.

³³ ídem

³⁴ La industria del transporte es el segundo sector que más contamina a nivel global. La ganadería es también una industria muy contaminante. Genera cerca del 15% de las emisiones globales emitidas por el ser humano, superando levemente a las emisiones de todo el sistema de transporte global (FAO, 2016 citado por Kracht, W. y Salinas, B. 2021).

Por otro lado, la creciente oferta de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) representa una oportunidad para la transformación de la minería chilena hacia una industria de bajas emisiones. Por tanto, Chile cuenta con importantes ventajas para impulsar una minería sostenible³⁵. Sin embargo, se debe aumentar el uso de este tipo de energías en diferentes sectores y promoverlas a través de inversiones públicas y privadas para la adopción de nuevas tecnologías.

En este contexto, las empresas de la gran minería del cobre asociadas al Consejo Minero han establecido metas generales para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Tabla 2). Actualizadas a mayo de 2021, las metas definidas por empresa son las siguientes³⁶:

Tabla 2. Metas generales para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería del cobre.

Empresa	Meta
Anglo American	Reducción global de 30% al 2030, respecto al 2016, y carbono neutralidad al 2040, con 8 operaciones carbono neutrales al 2030.
Antofagasta Minerals	Reducción de emisiones de alcance 1 y 2 en un 30% al año 2025 respecto del 2020, equivalente a 730.000 toneladas de CO ₂ e, y carbono neutralidad al 2050.
Barrick	Reducción global de al menos un 10% al 2030, respecto al 2019. BHP Reducción global de 30% al 2030, respecto al 2020, y carbono neutralidad al 2050. Para Chile, reducción de 70% de las emisiones al 2025.
Caserones	Cero emisiones de alcance 2 a partir del 2021.
Candelaria	Reducción de al menos un 80% de las emisiones de alcance 2 al 2023.
Codelco	Reducción de 70% de las emisiones al 2030, respecto al 2019.
Collahuasi	Cero emisiones de alcance 2 desde abril 2020 y balance neto de cero emisiones de alcance 1 y 2 al 2040.
Freeport McMoRan	Para América, reducción de 15% de las emisiones por cátodo de cobre al 2030 respecto al 2018. Para el Abra, cero emisiones de alcance 2 al 2021.
Glencore	Reducción global de 40% de las emisiones de alcance 1, 2 y 3 al 2035, con respecto al 2019, y carbono neutralidad al 2050.
KGHM	En Sierra Gorda, reducción de 40% de las emisiones de alcance 2 al 2021 y de 100% al 2023.
Río Tinto	Reducción global de 30% en la intensidad de emisiones y de 15% en las emisiones absolutas al 2030, respecto al 2019, y carbono neutralidad al 2050.
Teck	Reducción de la intensidad de emisiones de 33% al 2030, respecto al 2019, y carbono neutralidad al 2050.

Fuente: Consejo Minero (2021). "Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería del cobre asociadas al Consejo Minero".

³⁵Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineri%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

³⁶ Consejo Minero (2021). Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería del cobre asociadas al Consejo Minero.

El Ministerio de Minería lidera el sector y tiene el mayor interés en avanzar en materias relacionadas al cambio climático. En este marco, se ha elaborado la primera Política Nacional Minera al 2050, que fue publicada el 31 de Agosto del 2021 y, que ha contemplado w la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) para asegurar la coherencia de su diseño con las metas ambientales y climáticas, como procesos de participación ciudadana³⁷. Esta política se proyecta como un impulsor de desarrollo sustentable y de generación de empleo en Chile, que vela por un impacto neto positivo del sector, y que ha logrado consensuar el compromiso país con un nuevo modelo de desarrollo minero que tendrá el desafío de mantener el nivel de producción de minerales como el cobre y litio sin perder competitividad, respetando el medioambiente, con plena vinculación a las comunidades y con una sólida institucionalidad.

Adicionalmente, existe el compromiso de desarrollar un Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Minería el año 2022 de acuerdo con la NDC actualizada al 2020 y un Plan de Mitigación para el sector Minería de acuerdo con lo propuesto en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático. Estos planes establecerán las acciones con que se deberá cumplir, en concordancia con los objetivos de largo plazo establecidos en la ELPC.

A continuación, se presentan los objetivos sectoriales de largo plazo del sector minería³⁸:

- **Objetivo 1:** Desarrollar estrategias y/o proyectos de manera colaborativa, fomentando la participación directa de comunidades aledañas y pueblos indígenas.
- **Objetivo 2:** Minimizar los efectos ambientales armonizando el desarrollo de la actividad minera con el medio ambiente, impulsando proyectos para reducir el uso de agua dulce fresca en las operaciones mineras y soluciones basadas en la naturaleza para adaptarse al cambio climático.
- **Objetivo 3:** Minimizar, abordar y gestionar los impactos generados por los relaves activos, abandonados y críticos de la actividad minera.
- **Objetivo 4:** Estar a la vanguardia en la mitigación al cambio climático impulsando el suministro basado en fuentes de energías renovables, y promoviendo la investigación, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i) para el uso de tecnologías bajas o neutras en emisiones.
- **Objetivo 5:** Incorporar criterios de adaptación y riesgo al cambio climático en el diseño y operación de las faenas mineras con un foco multidisciplinario y local (considerando toda la infraestructura necesaria: faenas de alta montaña y en borde costero).
- **Objetivo 6:** Liderar el modelo de economía circular con un foco en el desarrollo de soluciones locales, reutilización de residuos e infraestructura y uso eficiente de recursos.

En relación a los objetivos sectoriales de largo plazo, el Plan de Mitigación para el sector Minería de acuerdo con lo propuesto en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático define las

³⁷Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (2021). Camino a la carbono neutralidad y resiliencia a más tardar al 2050. Obtenido de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/>

³⁸ Ídem

acciones y medidas a considerar en los planes de mitigación (las autoridades sectoriales deben considerar la factibilidad de implementación territorial y los planes de acción regional que se encuentren vigentes y que especifiquen posibles medidas o acciones relacionadas).

Para ilustrar de mejor manera los desafíos territoriales de la implementación del esquema de presupuestos de emisiones sectoriales, se entrega como ejemplo en minería de introducción de camiones mineros en base a hidrógeno verde en la minería del cobre. Una de las principales fuentes directas de emisiones de GEI, es la operación de los camiones mineros de explotación de alto tonelaje (CAEX), los cuales son operados con diésel. Se plantea que su reemplazo por alternativas que operen en base a hidrógeno verde, sería una medida que permitiría llevar cero a las emisiones de GEI relativas a su funcionamiento en faenas mineras. Dado que la minería del cobre, principalmente se encuentra concentrada en la macrozona norte del país, el impacto territorial de las reducciones de GEI asociadas a esta medida sería mayoritariamente en aquella zona geográfica, teniendo una menor incidencia en otras zonas del país, como por ejemplo las del centro-sur³⁹.

Respecto a los medios de implementación y seguimiento de la ECLP en Chile, se destacan los instrumentos complementarios para fomentar la gestión del cambio climático. En el marco de la estrategia, existe una gran oportunidad para transformar la economía nacional, impulsando acciones para reducir las emisiones, combatir el cambio climático, optimizar los recursos y al mismo tiempo, generar nuevas capacidades y empleos, en donde el crecimiento sostenible es uno de los cuatro ejes estratégicos de CORFO. Por esta razón, a través de distintas líneas e instrumentos de fomento, CORFO ha apoyado una serie de iniciativas en esta materia, tales como la economía circular, las energías renovables y la gestión de recursos hídricos entre otras. Los principales programas en esta línea son los instrumentos de financiamiento como Bienes Públicos con Adaptación al Cambio Climático (2019) y el Crédito Verde (2020), y los instrumentos de apalancamiento financiero⁴⁰.

³⁹ ídem

⁴⁰ ídem

OBJETIVOS

Objetivo General

Construir y entregar información pública al ecosistema minero sobre la probabilidad del cambio tecnológico y las oportunidades de negocio en el ámbito de la transición energética.

Objetivos Específicos

- Identificar la planificación y estrategias de las compañías mineras en relación con las expectativas de transición energética de la industria.
- Identificar y cuantificar oportunidades de negocio a corto y mediano plazo en los distintos nichos relevantes de la transición energética para proveedores y empresas interesadas en la minería.
- Analizar las barreras para la transición energética en minería a corto y mediano plazo.
- Caracterizar e identificar nichos relevantes en minería en la transición energética a largo plazo.

METODOLOGIA DE INVESTIGACION

Considerando la necesidad de identificar las oportunidades de negocio en la transición energética en minería chilena a corto y mediano plazo, se definió en conjunto con CNP, la ejecución de una investigación que detectara los nichos en el ámbito de la transición energética. A continuación, se detallan las características del estudio:

Diseño

El estudio consideró un **diseño mixto**, compuesto por 2 etapas basadas en un levantamiento de información de tipo cualitativo y un análisis cuantitativo de fuentes de información y documentos públicos. Los datos cualitativos y cuantitativos, fueron integrados estableciendo una discusión conjunta para lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio.

Específicamente, se hizo uso de datos cualitativos para indagar y analizar las visiones sobre la transición energética por parte de empresas mineras y proveedores del sector y datos cuantitativos para elaborar la cuantificación de los nichos de mercado identificados, a través del análisis de fuentes de datos secundarias de carácter público. El uso de este diseño y, métodos puede resultar de gran relevancia ante un fenómeno poco estudiado como lo es la transición energética y las oportunidades de negocio en este ámbito.

Diagnóstico

Con el objetivo de contar con información de base que permitiera caracterizar el escenario actual de la transición energética en el sector minero en Chile, se llevó a cabo la **revisión sistemática de fuentes secundarias** a partir de literatura gris e información pública disponible. Lo anterior nos permitió recopilar antecedentes sobre el fenómeno de la transición energética en Chile y el estado actual de ciertos vectores energéticos en la industria minera nacional e internacional. Aquello fue complementado con la realización de **entrevistas con stakeholders clave** sobre las proyecciones de la industria en este ámbito.

En esta etapa y a lo largo de todo el estudio, la Universidad Técnica Federico Santa María a través del Centro Nacional de Pilotaje, facilitó y aportó diversos antecedentes, participando en instancias de coordinación como reuniones de trabajo y de instancias investigativas como el levantamiento de información cualitativa con actores clave del sector.

Levantamiento de información cualitativa

Se realizó un proceso de levantamiento de información que permitió identificar el interés de las empresas de la minería en desarrollar procesos de transición energética, así como también

conocer los elementos particulares y las características que contemplan las estrategias de transición energética en el sector.

Para ello, a través de **entrevistas semi estructuradas** se profundizó en las características del consumo energético de estas empresas y en los tipos de tecnologías que utilizan, a partir de lo cual fue posible vislumbrar las particularidades que contempla la transición energética para responder a las necesidades de las empresas, conociendo sus percepciones y opiniones en relación con las implicancias de desarrollar este tipo de procesos. El levantamiento de información buscó conocer también las necesidades de estos actores por pilotar nuevas aplicaciones enmarcadas dentro de procesos de transición energética.

Los ejes temáticos de la pauta de entrevista tuvieron relación con necesidades de consumo de energía, conocimiento de proveedores del área de la transición de energía y vectores energéticos, interés en proyectos de transición energética, niveles de satisfacción y necesidades de pilotaje. Aquello permitió establecer una proyección más acabada de las tecnologías y vectores energéticos que se planea utilizar en la cadena de valor de la minería, conociendo las necesidades de las empresas mandantes, y determinar la gama de servicios requeridos para la transición energética en minería.

Muestra

Para el levantamiento de información cualitativa, se generó una muestra mediante una estrategia intencionada, la que buscó abordar las visiones de las compañías mineras y proveedores del sector. La conformación de la muestra final fue definida por Phibrand en conjunto con el equipo de CNP.

La muestra estuvo compuesta de 6 empresas y 8 proveedores del sector de la minería, heterogéneas en cuanto a su distribución geográfica y tamaño (Ver Pauta de entrevista en Anexo 1 y 2). El rasgo principal de los informantes clave radica en su posicionamiento en cargos que tengan incidencia en procesos de decisión e innovación, así como representantes de las áreas operacionales. Complementariamente, se realizaron 6 entrevistas a expertos en temáticas vinculadas a transición energética, equipos mineros, hidrógeno verde y otros vectores energéticos.

Los informantes fueron captados a través de llamados telefónicos, contactos establecidos y nuevos contactos ubicados a partir de los primeros, técnica conocida como “bola de nieve”. La muestra se conformó como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3. Muestra

1	Compañía Minera	Antofagasta Minerals
2	Compañía Minera	Ex Antofagasta Minerals
3	Compañía Minera	BHP
4	Compañía Minera	Codelco
5	Compañía Minera	Los Pelambres
6	Compañía Minera	División El Teniente (Codelco)
7	Proveedor	Air Liquide
8	Proveedor	Finning CAT
9	Proveedor	Komatsu
10	Proveedor	Komatsu Reman
11	Proveedor	Linde (Área Operaciones)
12	Proveedor	Linde (Grúas Horquilla Santiago)
13	Proveedor	Linde (Grúas Horquilla Antofagasta)
14	Proveedor	Reborn Electric Motors
15	Experto	Consejo Minero
16	Experto	Académico Universidad Técnica Federico Santa María (Departamento de Ingeniería Eléctrica)
17	Experto	Académico Universidad Técnica Federico Santa María (Departamento de Ingeniería Mecánica)
18	Experto	Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la Minería
19	Experto	Fraunhofer
20	Experto	Gama Leasing

Las entrevistas tuvieron una duración de 30 a 60 minutos y fueron aplicadas de manera telemática, durante los meses de Marzo, Abril, Mayo y Junio del año 2022, y se ejecutaron por profesionales senior de la empresa consultora, con alto conocimiento sobre el desempeño de la industria minera.

Análisis y resultados

Para el análisis de los datos cualitativos, las entrevistas fueron grabadas en audio y transcritas, dada la revisión acuciosa de las intervenciones de los entrevistados que demanda la utilización de esta técnica. Sobre la base de este corpus, se realizó el análisis a partir de la técnica del análisis de contenido, que cual sugiere una síntesis de las ideas centrales de los contenidos en consideración a los objetivos planteados.

La categorización de los datos se realizó con el software Atlas.ti 9, lo cual permitió la emergencia de categorías que permitieron describir y examinar la información y detectar ejes discursivos y diferencias entre actores.

Luego de esta etapa, se incorporaron al análisis documentos públicos, con el objetivo de complementar la información obtenida de las entrevistas y que a su vez permitieron elaborar una cuantificación de las oportunidades de negocio en los nichos de mercado identificados en la transición energética del sector⁴¹. Las principales fuentes de datos secundarias utilizadas para elaborar la cuantificación fueron las siguientes:

- Aga Van Zeebroeck. R. El dimetil éter (DME) como nuevo combustible diésel limpio.
- Cochilco. (2021) “Proyección de la producción esperada de cobre 2020 – 2031”
- Cochilco (2021) Producción Chilena de Cobre de Mina/ ChileanCopper Mine Production
- Codelco. (2020). “Leasing financiero equipos para movimiento de tierras mina rajo”. Minería chilena. (2014). Mining Equipment Survey.
- Zanlungo, J. Braga, I. (2015). Análisis de determinación del tamaño óptimo del negocio minero, caso evaluación para gran minería a rajo abierto.

⁴¹ La metodología del ejercicio de cuantificación será detallada en el capítulo II del presente documento.

RESULTADOS

1. Estrategias de transición energética de las compañías mineras

Las entrevistas realizadas con los representantes de las empresas mineras y la información pública disponible, reflejan la existencia de políticas y estrategias de desarrollo sostenible en la minería y que podrían transformarse en un potencial de desarrollo de negocios para proveedores. Como ya se ha mencionado, en mayo de 2021 las empresas de la gran minería del cobre asociadas al Consejo Minero, han establecido metas generales para la reducción de emisiones de GEI, las cuales en su mayoría apuntan a alcanzar la carbono neutralidad al 2050. Sin embargo, los consumos de la minería dependen del proceso y aquello implica que la reducción de emisiones para cada uno de ellos deba ser enfrentada con soluciones específicas.

Para lograr estas metas, las compañías mineras han abordado el desafío con estrategias vinculadas a la transformación de la matriz energética, han dado sus primeros pasos en electromovilidad de vehículos y maquinarias mineras, sustitución de combustibles fósiles por energías renovables en algunos procesos mineros e inversión en modernización de fundiciones y otros activos con miras a una mayor sustentabilidad.

1.1 Matriz energética dominada por tecnologías limpias: contratos eléctricos PPA (Power Purchase Agreements)

La transición hacia una matriz energética dominada por tecnologías limpias – en reemplazo de contratos basados en combustibles fósiles-, ha aparecido como una oportunidad para transformar la minería chilena en una industria de bajas emisiones. Específicamente, las compañías mineras han estado abordando la estrategia de transición energética desde los contratos eléctricos de suministro renovable y la certificación del uso de energías limpias, lo cual es permitido por las normativas internacionales, ya que es una forma de poder calcular el factor de emisión de las empresas.

A través de estos contratos, la minera como cliente solicita a su generador de energía que el suministro sea con energías renovables. Esta forma de integración ha sido la principal opción elegida por las operaciones mineras chilenas a través de procesos de renegociación de sus contratos eléctricos a carbón. 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.⁴² Algunas compañías han terminado sus PPA pagando multas significativas, con el objetivo de iniciar contratos con energías renovables y con precios más convenientes, ya que esta estrategia es considerada una gran contribución a la transición hacia el logro de cero emisiones a 2050. El Anexo 3 del presente documento contiene información publicada por Cochilco⁴³ que refleja el interés de la minería por implementar esta estrategia basada en hacer más limpios sus contratos eléctricos.

Según las entrevistas realizadas, estas son las medidas de mayor impacto en el corto plazo. En una de las compañías, el 70% de la disminución de la huella carbono alcance 1 y 2, tiene que ver principalmente con cambiar los contratos de energía que tienen actualmente.

En otro caso, ya han transitado hacia contratos 100% renovables, lo cual es concordante con sus metas públicas de reducir un 30% de las emisiones de alcance 1 y 2 hacia el 2030 con respecto al 2020 y lograr cero emisiones hacia el 2050. Hasta ahora, esta estrategia les ha permitido reducir sus emisiones en 3 millones de toneladas, de un total de 5 millones en el año fiscal 2020.

Sin embargo, dado que las proyecciones de demanda energética tienden al alza, desde las compañías mineras se percibe un riesgo relacionado con el desequilibrio entre la demanda y la capacidad que existe de proveer energías limpias por parte de las generadoras. Es decir, que administrativamente estas últimas no sean capaces de proveer a todos los actores, ya que no se han construido centrales nuevas a propósito de las renegociaciones de contrato. Una de las alternativas sería operar con racionamiento, pero aquello implica usar más carbón y diésel en el sistema para poder sostenerlo a un nivel mínimo, es decir, contaminar más en vez de limpiar el sistema.

En relación a ello, el Coordinador Eléctrico Nacional, se encuentra implementando desde el mes de abril una plataforma para dar mayor certidumbre a la compra de energía renovable, llamada RENOVA, una plataforma nacional de trazabilidad de energías renovables. Esta innovación se desarrolló en base a tecnología blockchain y permitirá registrar cada MWh generando, asegurando su plena trazabilidad -desde su origen hasta su destino- y que la información no pueda ser alterada, garantizando su plena confiabilidad. Con esta plataforma las empresas podrán saber con total certeza si sus procesos productivos o productos han sido efectivamente elaborados con la electricidad proveniente de las fuentes de energías renovables que han contratado⁴⁴.

Dado que las proyecciones de demanda energética tienden al alza, una de las opciones para las compañías sería buscar más PPA's u optar por la generación en sitio, donde el factor

⁴²COCHILCO (2022). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2021-2032. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyeccion%20Consumo%20EE%202021-2032.pdf>

⁴³ Idem

⁴⁴Actualmente 64 organizaciones ya están participando en esta plataforma, la cual no tiene costos para sus usuarios. Su funcionalidad y tecnología permiten certificar la producción de Hidrógeno Verde y sus derivados. Permite sinergias entre la coordinación de electrolizadores (5GW al año 2025, según Estrategia Nacional) en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y Sistemas Medianos y proceso de certificación de Hidrógeno Verde.

determinante serán los precios y los incentivos, es decir, tener un *carbontask* que sea significativo para que ayude a los proyectos de descarbonización a ser más competitivos, versus otros proyectos mineros que compiten por el mismo capital. En torno a ello, uno de los principales desafíos para la industria a corto plazo es lograr que la demanda por contratos verdes no signifique mayores precios para las empresas.

La estrategia de transición energética basada en el cambio en la matriz energética ha permitido a las compañías mineras reducir sus emisiones de alcance 2 (indirectas), no obstante, las estimaciones indican que el consumo energético de la minería del cobre aumentará en un 41% al año 2029⁴⁵, por lo que seguiría teniendo una gran participación en las emisiones de GEI del país.⁴⁶ En base a esta estrategia, la minería no estaría ahorrando electricidad ni diésel, lo que posiblemente aumente su participación en las emisiones del país, debido al esfuerzo de otros sectores como el transporte. Considerando que la lucha por el cambio climático y la sustentabilidad son aspectos cada vez más valorados, el uso de energías renovables en minería lograría darle valor agregado al cobre, diferenciarse en el mercado en términos de sustentabilidad en la producción y brindando coherencia con las estrategias de descarbonización del país.

1.2 Electromovilidad

La electromovilidad está teniendo un auge a nivel global y representa un estímulo relevante para el sector minero y es una oportunidad de cimentar una minería más sustentable dado el impacto positivo que esta tiene en el plano ambiental como en la productividad, que conlleva contar con tecnologías que no dependan de combustibles fósiles. Los vehículos y maquinaria eléctrica no emiten gases contaminantes ni de efecto invernadero dañinos para el clima y el aire. Además, son silenciosos, por lo que también contribuyen a la reducción de contaminación auditiva. En ese sentido, la implementación de esta estrategia aparece como una oportunidad para avanzar en los sentidos de transformación que requiere el sector minero.

En una de las compañías mineras entrevistadas, existe la meta de electromovilizar las minas subterráneas al 2030. Para ello, desde el 2018 ha desarrollado pilotos en electromovilidad y generando condiciones habilitantes para avanzar en esta línea, estableciendo por ejemplo, alianzas tecnológicas. En esta hoja de ruta, se consideró avanzar simultáneamente en 4 estadios de la electromovilidad⁴⁷:

- Buses y vehículos livianos logísticos.
- Equipos de apoyo a la producción.
- Equipos productivos (LHD, CAEX, Dumper, etc.)

⁴⁵ COCHILCO. (2018). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2018-2029.

⁴⁶Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineria%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

⁴⁷ idem

- Equipos productivos eléctricos usando hidrógeno verde cómo combustible primario.

Entre otras actividades, se llevaron a cabo pilotajes carreteros el año 2018, siendo los primeros vehículos probados en operaciones mineras exteriores. Gracias a ese proceso, se fue avanzando en distintos tipos de equipos hasta llegar a una de las primeras categorías relevantes en sus operaciones, que son los buses de transporte de personas. Este fue el primer escalamiento, realizado en 3 de sus divisiones, donde estas tecnologías ya fueron validadas.

Hasta ahora, en 2 de ellas se ha implementado la electromovilidad de minas subterráneas con buses y taxi buses de transporte de personal al interior de la mina. Se espera que el 2023 puedan tener una flota 100% eléctrica de interior mina, es decir, el transporte de los trabajadores hasta los sectores productivos de la mina subterránea. A nivel de compañía, actualmente se encuentra en proceso de licitación 150 buses eléctricos, lo que será la flota eléctrica más grande del mundo de una empresa minera:

“Y eso significa tener buses de transporte de personal al interior de la mina que sean eléctricos, camionetas todas eléctricas al 2030, equipos de apoyo a la producción: camiones de cama baja, camiones tijera, en fin, eléctricos. Los mismos equipos de producción, como son las palas –les llamamos LHD- y camiones, eléctricos. Y también todo lo que es la preparación minería de tunelería, desarrollos horizontales y verticales, obras civiles, todo eso tiene que estar eléctrico”.

(Compañía Minera)

Considerando los beneficios de seguridad, ambientales y económicos, a los que se suma el aumento de la demanda de cobre que implica el desarrollo de la industria de automóviles eléctricos, se pretende aceleradamente extender este tipo de tecnología a equipos de apoyo y de producción. Además, se han estado probando equipos mineros utilitarios y categorías de equipos disponibles que sean representativos de las flotas, para estar preparados en el año 2025 a generar compras, para lo cual es un requisito que exista disponibilidad y que les permita seguir siendo competitivos. Sin embargo, estos equipos aún no cuentan con validación:

“Pero todavía en la otra línea, lo que te comentaba de los equipos de apoyo a la producción, los mismos equipos de producción: uno, no son tantos equipos los que hay en el mundo y dos, no los hemos probado todavía. Recién ahora en un mes más vamos a estar trayendo un LHD eléctrico que es de Epiroc que se llama ST14, que es 100% a batería y ahí vamos a ir a probar más que si funciona en la calle, si funciona el tema del cambio de batería. Porque cuando se acaba la batería tení’ que ir con un teclé y sacar la batería y poner otra. Así es como vay’ de a poquito validando la tecnología”. (Compañía Minera)

La electromovilidad es una tecnología que está en fase de maduración. Operativamente, está siendo conveniente desde el punto de vista económico implementar este tipo de solución comparado con el diésel:

“Por lo tanto, para mí esa área de aquí a 3 años va a empezar a escalar. Yo creo que de aquí a 2025 se verá un punto de inflexión en donde ya la tecnología esté mayormente disponible, pero nos vamos a centrar principalmente en flotas cautivas, o sea, no va a haber todavía suficiente como para poder maximizar el desarrollo de esa tecnología en la calle”. (Compañía Minera)

Por razones de disponibilidad tecnológica, muchas compañías mineras se han planteado ser tecnológicamente neutros, es decir, buscar la carbono neutralidad desde tecnologías diversas que permitan bajar las emisiones a corto plazo, ya que las tecnologías disruptivas –como el hidrógeno verde- hoy en día no están disponibles. Es por ello que se han generado iniciativas como el *Charge On Innovation Challenge*, que conglomeró al sector minería y busca promover soluciones para disminuir las emisiones de GEI en las operaciones mineras y mercados emergentes asociados a este desafío. En ese sentido, existe disposición y colaboración en el sector desde el reconocimiento de la necesidad de resolver los desafíos comunes y validar tecnologías.

“Entonces, hay colaboración en el sentido de querer aprender, compartir cuales son los desafíos para las distintas compañías y son problemáticas comunes”. (Compañía Minera)

Sin embargo, aún no se han elaborado medidas de adaptación y mitigación reconocidas por la gran, mediana y pequeña minería a la electromovilidad. Una condición habilitante sería establecer un compromiso por parte de la industria a través de una hoja de ruta tecnológica para la adopción de energías renovables y electromovilidad que incorpore flexibilidad, es decir, que las nuevas tecnologías que vayan adquiriendo madurez se adhieran a la misma⁴⁸.

La estrategia de transición energética basada en la electromovilidad permitiría reducir las emisiones de alcance 1 que genera la minería y cumplir las metas establecidas por el sector. No obstante, para realizar cambios que permitan reducir las emisiones de GEI de manera significativa, las estrategias actuales en electromovilidad no estarían abordando suficientemente el tema de la reducción de emisiones⁴⁹. Al clasificar los consumos más altos de diésel por tipo de

⁴⁸Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineri%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

⁴⁹ Avello, A. (2021). Estudio técnico-económico de tecnologías que impulsan el desarrollo de la electromovilidad en minería. Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Metalurgia y Materiales. Santiago-Chile. Obtenido de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50618/3560902038070UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

equipos, un análisis realizado para una de las compañías mineras en 4 de sus divisiones, da cuenta que el mayor consumo de combustible se concentra en Mina, específicamente en camiones de extracción (CAEX), equipos de carguío y algunos equipos de apoyo como bulldozers. Al desglosar el consumo de diésel por equipos de esta compañía en 2019, se observa que estos equipos pequeños o de servicios -en los cuales actualmente se ha estado implementando la electromovilidad- solamente demandan alrededor de un 5% del diésel total. En ese sentido, es relevante comprender que existen gestiones que dependen directamente de las compañías mineras, pero también que existen limitaciones tecnológicas que son propias del mercado para la implementación de la electromovilidad en equipos grandes que demandan gran parte del consumo de diésel. Actualmente, las tecnologías disponibles no poseen la potencia requerida para llevar a cabo los variables ciclos de trabajo de los equipos utilizados en minería. En los siguientes capítulos, daremos cuenta en detalle de las condiciones habilitantes y barreras en torno a la implementación de esta estrategia.

2. Nichos en la transición energética a corto y mediano plazo

Como se mencionó, actualmente una de las estrategias de mayor impacto para las compañías mineras ha sido la implementación de la electromovilidad a nivel de equipos pequeños o auxiliares y medianos o de apoyo. Lo anterior, nos permite establecer que existirá una demanda cada vez mayor de estos equipos por parte de las compañías, lo cual en términos de mercado representaría una oportunidad para proveedores y empresas del sector.

El presente capítulo busca identificar y cuantificar los nichos en la transición energética a corto y mediano plazo, con el objetivo de construir y entregar información al ecosistema minero sobre las probabilidades de cambio tecnológico. Para ello, se entregará un panorama actual de cada nicho identificado en un horizonte temporal situado en el año 2027, vinculado directamente a los escenarios recogidos de las estrategias de las compañías mineras y la perspectiva de los proveedores. En primer lugar se describen los nichos identificados en las entrevistas realizadas a través de un análisis cualitativo orientado a detectar los principales puntos críticos y elementos relevantes, considerando también datos y estudios provenientes de fuentes secundarias, los cuales se consideraron complementarios a las fuentes primarias y que permitieron elaborar una cuantificación de las oportunidades de negocio en los nichos de mercado identificados en la transición energética del sector.

Tomando como referencia el análisis presentado en el capítulo anterior, así como las percepciones de proveedores y compañías mineras recogidas de las entrevistas, es posible concluir que existen oportunidades de negocio factibles en los nichos de fabricación y reconversión de equipos pequeños y medianos. A continuación, se especifican los nichos y equipos identificados:

Tabla 4. Nichos de mercado en el escenario de la transición energética en minería

Nicho	Especificación	Equipos
1. Fabricación y reconversión de equipos pequeños o medianos.	Vehículos destinados para el transporte de personal.	<ul style="list-style-type: none">• Bus (12 metros aprox)• Minibús y Taxi buses(9 metros aprox)• Camioneta
2. Reconversión de equipos medianos a eléctricos	Equipos de trabajo minero con menos de 700 HP.	<ul style="list-style-type: none">• Bulldozer• Excavadora• Retroexcavadora• Motoniveladora
3. Reconversión de equipos medianos a	Equipos de trabajo minero con más de 700 HP.	<ul style="list-style-type: none">• Bulldozer• WheelDozer

combustibles sintéticos.		<ul style="list-style-type: none"> • Perforadora superficie • Cargador frontal (LHD)
4. Mantenimiento y reparación de equipos pequeños y medianos.	Capacidades y costo de mantenimiento para la futura generación de equipos.	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos señalados en los nichos 1, 2 y 3.

Para llevar a cabo la cuantificación, se realizó un análisis a la magnitud del mercado potencial de los equipos anteriormente señalados y que muestran potencial para una reconversión o fabricación de cambio energético. Para lograr esta estimación, se utilizaron diferentes fuentes de información, a saber: catastros de equipos, licitaciones públicas, registros de importaciones y estimaciones en base a parámetros de la industria. Asimismo, el crecimiento de la producción de cobre y la cantidad de equipos necesarios al 2022.

De esta forma, fue posible generar estimaciones más exactas para la cantidad de vehículos necesarios para cada año, hasta el 2027. Cabe destacar que, la elección de este año fue considerada en base a que los equipos y vehículos son renovados posterior a que 10 años de vida útil, mientras que para las camionetas se consideraron renovaciones cada 5 años. Dicho esto, para llevar a cabo la cuantificación de las unidades de equipos pequeños y medianos del mercado potencial, se utilizó una metodología particular para cada uno de los nichos de negocio descritos anteriormente, la cual será detallada en los apartados posteriores.

Por otro lado, respecto a la estimación de precios, se realizó la revisión de cotizaciones de equipos y precios en base al CAPEX del mercado, considerando la información entregada por diferentes proveedores o estudios en los cuales se presenta esta información.

Por último, un elemento relevante por considerar es que no se analizará el atractivo de oportunidades a partir de la construcción de casos de negocios. Si bien, realizar cuantificaciones a las diferentes oportunidades es una práctica viable en la mayoría de sus casos, actualmente existe una variedad de negocios, inversiones y potenciales proveedores, que están abarcando este campo. De esta forma, realizar cuantificaciones de casos específicos de negocio se escapa del objetivo que busca el presente estudio.

2.1 Fabricación y reconversión de equipos para transporte de personal

El diésel –utilizado principalmente en los equipos de minería- es responsable del 89% de las emisiones de alcance 1 de la minería chilena del cobre y de un 26% considerando las emisiones totales de alcance 1 y 2⁵⁰. Como se mencionó en el capítulo precedente, la electromovilidad ha aparecido como una tecnología prometedora y viable para reemplazar los motores de combustión, ya que son menos contaminantes, más silenciosos y requieren menor mantención. Son vehículos más eficientes, ya que al comparar una batería con un estanque de combustible equivalentes en energía, el vehículo eléctrico recorre 3 km versus 1 km en el caso del convencional. Específicamente, en la minería subterránea estos vehículos son más seguros, ya que no liberan gases tóxicos ni material particulado y generan menos calor, lo que reduce la necesidad de ventilación y permite ahorrar energía⁵¹.

A esta tendencia responden los planes de compañías mineras que han ido incorporando buses y taxi buses eléctricos para el transporte de sus trabajadores; mientras que por el lado de las empresas proveedoras, están incursionando en el desarrollo de equipos que operan con baterías eléctricas. En ese sentido, desde el punto de vista técnico es factible la implementación de la electromovilidad en distintas fases del proceso productivo y si bien la mayoría de los OEM (*Original Equipment Manufacturer*) de la industria del cobre están desarrollando equipos eléctricos en todas las categorías, por ahora la mayor oferta de equipos está en buses y vehículos livianos fabricados o reconvertidos.

Existe un proveedor nacional, empresa que ha desarrollado una planta de electromovilidad enfocada en la fabricación y reconversión de vehículos eléctricos en Rancagua, región de O'Higgins. La empresa busca potenciar la electromovilidad a través de la economía circular, reaprovechando gran parte de los vehículos, que aún tienen vida útil, obteniendo así buses 100% eléctricos a un menor costo de inversión y emitiendo menos CO₂ al momento de fabricarlos. La planta tiene una capacidad proyectada de 200 buses al año, 100% a batería y cuentan con un cargador de 150 KW que carga estas baterías en periodos de 40 minutos a 1 hora y con ello es capaz de realizar todos los recorridos del día.

En el área de reconversión de la empresa, se toman vehículos al final de su vida útil, se le hace un *overhall* completo de carrocería y chasis y se cambia su sistema de tracción diésel por uno 100% eléctrico. Es una remanufactura de vehículos, donde se transforman a soluciones 100% eléctricas. De aquel proceso, se obtiene un vehículo equivalente a uno nuevo con un costo más competitivo y a través de un esquema circular, evitando generar chatarra en el sistema dándole una nueva vida a estos vehículos.

⁵⁰Ídem

⁵¹ Kirk, T., & Lund, J. (2018). Decarbonization Pathways for Mines: A Headlamp in the Darkness.

En el área de fabricación de buses nuevos, cuentan con una alianza con distintos fabricantes brasileños, con los que adquieren los chasis y carrosería nuevos, se electrifican en Chile, naciendo un bus nuevo chileno 100% eléctrico. Estos están diseñados para soportar ambientes mineros de alta humedad, aire salado, lodos ácidos, pendientes pronunciadas, nieve intensa, suelo helado y accidentado.

“Tienen que cumplir con todos los requerimientos de la mina. En el caso de [Compañía Minera] tiene que cumplir con el estándar de control de fatalidad 21, que tiene una serie de requisitos como cumplir con la R66 para el volcamiento de la superestructura, tiene que tener todo el equipamiento minero. Adicionalmente se hacen una serie de modificaciones que solicita el cliente con partes con acero inoxidable, cambiamos chapas de aluminio por fibra para hacerlo más resistente a la corrosión y presencia de agua dentro de la minería. Entonces es un vehículo especificado y diseñado especialmente para operación minera”. (Proveedor)

En una de las compañías mineras, la utilización de estos vehículos ha implicado una reducción de costos de hasta un 70%, considerando el costo de la electricidad y combustible actual; disminución de emisión de CO₂ de hasta un 85% en comparación con una camioneta diesel; y un mejor rendimiento, en tanto se gastan 3,4\$ menos por cada kilómetro recorrido. En ese sentido, estos vehículos para el transporte de personal, han dado buenos resultados. El proveedor mencionado, no ha trabajado en la remanufactura de camionetas ni con cambio de motores en estos equipos.

Desde la visión de las compañías mineras, existiría una escasez de camionetas 4x4 eléctricas - las cuales son un requisito en el sector minero-, ya que los proveedores de estas soluciones son principalmente extranjeros y en ese contexto es difícil que la minería tome la decisión de electrificar toda la flota de autos y camionetas. Además, no se conoce el comportamiento de estos equipos en minería de alta montaña, donde por ejemplo, existen temperaturas bajas, que en invierno llegan a -15, -20. A esto se suman temas legislativos que dificultan la adopción de nuevos equipos, por ejemplo, las exigencias de cilindrada. Al intentar homologar las camionetas eléctricas a las camionetas a combustible, el precio se eleva y no es rentable adquirirlas.

Respecto a los requisitos para proveedores, en las licitaciones actuales -específicamente de autos y camionetas eléctricas-, ha sido difícil adquirirlos, ya que muchas veces estos vehículos no cumplen con los estándares que requiere la minería, lo cual además dificulta su validación. Hasta ahora, las compras de estos vehículos se deben realizar en el mercado internacional, lo cual económicamente es poco factible e inviable para ser realizado con toda la flota.

“Entonces, se hizo una licitación en la cual se dejó escrito que queríamos electromovilidad. Pero si tú miras hoy en día en el mercado no hay camionetas eléctricas 4x4 con el nivel de exigencia que nosotros tenemos. Le puedes preguntar a cualquier proveedor de equipos eléctricos. Hay que ir a buscarlas, traerte unas 3, pero así como toda la flota eléctrica, difícil. Además, al tirar

esta licitación, no te aparecen los proveedores de las camionetas, no te aparece el dueño de la camioneta, sino quien te la arrienda. Que es el que se gana la licitación, pero son operadores que te la arriendan y que ya manejan el negocio de antes, te ofertan en función de eso. Yo creo que todos los proveedores buscan cumplir con el estándar al menor costo y como el estándar es alto, mientras más barata sea la tecnología mejor y chao [...] porque no estamos exigiendo la electromovilidad, solo la estamos viendo con muy buenos ojos. Internamente podemos ponderar de mejor manera la electromovilidad en las licitaciones, pero no es una cuestión exigible y si el mercado no te lo ofrece, nada que hacer po”. (Compañía Minera)

Se espera que las tecnologías sean más eficientes y tengan un costo similar a los equipos tradicionales o inferior, pero en la etapa actual esto último es difícil y se requiere que las organizaciones estén dispuestas a entrar en proyectos que permitan probar los equipos ya existentes y hagan las modificaciones correspondientes sobre ellos. En algunas compañías, se proyecta para 2027 –con las nuevas licitaciones-, establecer nuevos contratos que permitan un 100% de electromovilidad. Se tiene la meta de probar todas las categorías de equipos disponibles o los que sean más representativos de la flota para el 2025 estar preparados para hacer compras masivas de estos equipos y llegar al 2030 con todos los equipos principales eléctricos:

“Contratamos constructoras que se dedican a contratar y comprar equipos para satisfacer el requerimiento que nosotros tenemos. Por tanto, la electromovilidad también se tiene que empujar desde ese lado, pero es más bien un empujar a las empresas a que la incluyan y lo hemos incluido en algunos contratos -el hecho de tener un porcentaje de electromovilidad dentro de las obras civiles-. Pero como esto es incipiente y actualmente estos contratos están empezando, actualmente no tenemos nada, nos estamos preocupando de que cuando estos equipos puente que se les llama –que son los equipos con los que parten los contratos- salgan y lleguen los definitivos para el contrato, esos sean electromóviles”. (Compañía Minera)

La industria minera chilena, es un comprador de soluciones más que equipos o servicios en particular. En ese sentido, el rol de los proveedores se cumple a cabalidad respecto a otras industrias, por ejemplo la construcción. Desde nuestra perspectiva esto se puede explicar fundamentalmente por las características del negocio minero, el cual maximiza la utilidad, primero, por la mayor producción, luego por la baja de costos y por último por el precio, ya que esta variable es un factor exógeno y además, los grandes volúmenes de inversión y tiempos de

desarrollo de los proyectos imposibilitan que cada uno de ellos se mueva en función de los precios de mercado.⁵²

Estos factores han hecho que las distintas compañías mineras busquen en el tiempo minimizar la utilización de recursos internos, externalizando (en proveedores y contratistas) una parte importante de los procesos que no se relacionan directamente con la extracción y procesamiento de los minerales. Cabe señalar que el nivel de externalización variará en función del margen entre precio y costo unitario de producción y de lo estratégico que sea la función tercerizada⁵³.

En este contexto los proveedores deben asumir la responsabilidad (y en muchos casos condición de compra) de entregar un servicio o soporte integral. Los primeros que han debido asumir esto son los OEM (*Original Equipment Manufacturer*) o desarrolladores originales de los equipos, quienes, en su mayoría proveedores internacionales, además de proveer los equipos deben mantenerlos, repararlos, actualizarlos y hasta en algunos casos, operarlos.

Pese a las dificultades, la minería es la actividad económica que tiene más buses eléctricos, después del transporte público, cuestión que se traduce en la reducción de 48 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) al año, aproximadamente. Aquello acerca a la industria a la transición tecnológica y el proceso de planificar estas implementaciones está ayudando a preparar las bases del conocimiento para una electrificación total del transporte minero. Algunas de las razones por las cuales ha sido relevante la electromovilidad en transporte de personal al interior mina, es porque existe un origen y un destino fijo, y, por lo tanto, hay una “zona de control”, permite planificar los terminales de carga, y así favorecer economías de escala y operación. Y en tercer lugar, al observar el roadmap tecnológico minero, a la fecha el bus de transporte de personas, es uno de los pocos vehículos que ya tiene oferta comercial con al menos 8 oferentes con vehículos homologados por el 3CV del Ministerio de Transportes, por lo tanto, la industria puede confiar en las marcas y ya existen datos del rendimiento y funcionamiento de la mayoría de esos vehículos⁵⁴.

Dicho esto, a continuación, se detalla la metodología utilizada para la cuantificación del nicho descrito y sus resultados. Este nicho contempla los siguientes equipos utilitarios: **buses con más de 12 metros de largo, minibuses y taxibuses de máximo 9 metros de largo y camionetas 4x4 de uso minero**. La metodología utilizada para este nicho tuvo en consideración que los equipos como buses, minibuses y taxibuses, cuentan con un nivel de desarrollo tecnológico que hace posible su fabricación a nivel nacional, mediante la importación de partes y la reconversión de otras. Sin embargo, las camionetas requieren mayor desarrollo para su reconversión, mientras que su fabricación cada vez se desarrolla a mayor escala.

⁵² Phibrand (2013). Estudio de Comportamiento de Compras de la Minería. Obtenido de <http://www.phibrand.com/portfolio-item/nivela-mineria/><http://www.phibrand.com/portfolio-item/nivela-mineria/>

⁵³ Ídem

⁵⁴ Revista Nueva Minería y Energía (2020). Transporte de personal en minería. Obtenido de <https://www.nuevamineria.com/revista/transporte-de-personal-en-mineria-por-buen-camino/>

Para estimar el mercado de vehículos de transporte de personal masivo -en este caso buses y minibuses-, se utilizaron datos de los equipos licitados por Codelco⁵⁵, extrapolando estas necesidades a las empresas de producción de cobre en Chile, lo que permite obtener una cuantificación de equipos por tipo.

A continuación, se expone la cuantificación par la demanda de buses, minibuses y taxibuses al 2022:

Tabla 5. Demanda buses, minibuses y taxibuses al 2022

Equipo	Requerimiento 2022
Bus (12m apróx)	2350
minibús y taxibuses (9mapróx)	1000
	3350

Fuente: Phibrand 2022.

Teniendo en consideración la cantidad de equipos requeridos para el 2022, se estimó el porcentaje necesario para su reconversión. Para ello, se utilizó como referencia la proyección para el crecimiento esperado en la minería de cobre con miras al 2030⁵⁶, tomando como unidad de medida los kilos toneladas por día (KTPD). Asimismo, se trabajó bajo el supuesto de un 40% de reconversión inicial para el primer año⁵⁷, sumado al cambio anual de equipos que realizan las empresas mineras, estimado en un 10% para vehículos con una vida útil de 10 años.

De esta forma, según las estimaciones realizadas, se presenta el crecimiento en la producción de cobre esperada entre los años 2022 al 2027:

Tabla 6. Crecimiento en la producción de cobre esperada entre los años 2022 al 2027

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Producción esperada (KTPD)	6143,4	6476,5	6755,7	7097,5	7157,9	7248
Crecimiento %		5%	4%	5%	1%	1%

Fuente: Phibrand, en base a Cochilco 2020.

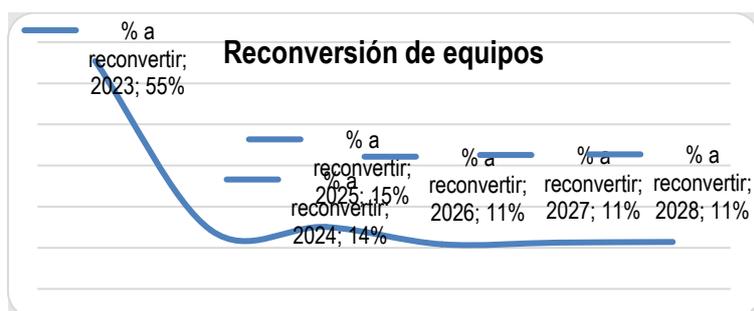
A continuación, se presenta el modelo de reconversión para buses, minibuses y taxibuses, en relación con la estimación de crecimiento de cobre y el supuesto de reconversión:

⁵⁵Cochilco. (2021) "Proyección de la producción esperada de cobre 2020 – 2031". Obtenido de: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyeccion%20de%20la%20produccion%20esperada%20de%20cobre%202020%20-%202031.pdf>

⁵⁶ Ídem

⁵⁷ 40% se basa en que los equipos con vida útil de 5 años (Camionetas) serán reconvertidos solo si su antigüedad es menor a 2 años (2/5=40%). Lo mismo para equipos de 10 años vida útil (medianos, buses)

Gráfico 1. Modelo de reconversión para buses, minibuses y taxibuses



Fuente: Phibrand 2022.

Teniendo en cuenta que para el año 2022 la demanda de buses es de 2.350, la reconversión esperada (asumiendo el crecimiento esperado de cobre en conjunto con el supuesto de reconversión) debiese ser de 1.302 unidades para el 2023, obteniendo una cantidad acumulada de 2.781 equipos con un nuevo suministro energético para el 2027. Asimismo, en el caso de los minibuses y los taxibuses, considerando las 1.000 unidades registradas en el 2022, la reconversión esperada para el 2027 en este tipo de vehículos debiese ser de 1.183 unidades.

En efecto, en ambos casos, la cantidad de equipos reconvertidos energéticamente para el 2027 supera los registros actuales de equipos que aún usan diésel como fuente energética.

A continuación, se describe la reconversión esperada por año para ambos equipos de cara al 2027:

Tabla 7. Reconversión esperada por año para buses, minibuses y taxibuses al 2027

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Cantidad acumulada
	55%	14%	15%	11%	11%	11%	
Bus (12m apróx)	1,302	336	354	255	265	268	2.781
minibús y taxibuses(9m apróx)	554	143	151	109	113	114	1.183

Fuente: Phibrand 2022.

Respecto a precios, las estimaciones de la industria muestran que el CAPEX utilizado al reconvertir equipos es un 70% menor al CAPEX utilizado para comprar estos equipos nuevos, lo que hace que la opción de reconversión sea una oportunidad real dentro de este nicho.

En particular, si se estima que un bus de uso minero puede alcanzar un valor de 500.000 dólares, un bus reconvertido puede tener un costo alrededor de los 350.000 dólares, obteniendo un margen de hasta 150.000 dólares por equipo, el que puede ser usado para ofrecer licitaciones más competitivas, o bien, en pagar las inversiones requeridas. En el caso de los minibuses y

taxibuses, la estimación del valor en este tipo de equipos fue de 80.000 dólares, de manera que el costo de reconversión es de 56.000 dólares, con un margen de 24.000 dólares.

Dicho esto, para estimar el mercado de reconversión en los equipos se tomó en consideración la demanda de equipos por años, el porcentaje de reconversión esperado para cada año y el costo de reconversión de equipos (70% del CAPEX de un equipo diésel). De esta forma, se obtuvo la siguiente fórmula:

Mercado de reconversión:

(Demanda de equipos x año) * (% de reconversión) * (valor equipo al 70% de su CAPEX)

A continuación, se describe el tamaño de oportunidad en la reconversión buses, minibuses y taxibuses por año, considerado la fórmula recién descrita:

Tabla 8. Tamaño de oportunidad en la reconversión de equipos pequeños (bus, minibús y taxibus) para cada año, en dólares/año

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total (2022-2027)
Bus	455.846.600	117.707.732	23.863.822	89.249.507	92.603.211	93.904.353	973.175.225
Minibús y taxibuses	31.036.364	8.014.143	8.433.282	6.076.562	6.304.899	6.393.488	66.258.739

Fuente: Phibrand 2022.

En base a los datos presentados anteriormente, se espera que para el 2027 el mercado de buses reconvertidos alcance unas 2.781 unidades, lo que correspondería a una oportunidad de 973,18 (MUS), mientras que el mercado de minibuses y taxibuses se espera que pueda alcanzar los 66,25 (MUS) considerando 1,183 unidades reconvertidas para el 2027.

Respecto a las camionetas, es importante señalar que los equipos eléctricos aún se encuentran en etapas incipientes, con pocos modelos disponibles y poca autonomía en general. Sin embargo, se espera que esto evolucione en el tiempo, hacia la electrificación en general de los equipos. Tomando en consideración este supuesto, se puede plantear que para el mercado de camionetas 4x4 para la minería, hay oportunidad de negocio para su reconversión en el futuro, al igual que su importación directa.

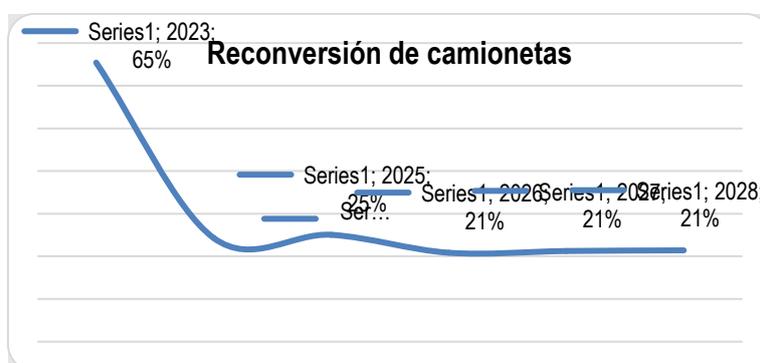
La tecnología específica para la reconversión aún se encuentra en desarrollo, por lo que no es posible conocer a priori qué equipos se reconvertirán, sin embargo, se realizó una estimación del porcentaje de equipos aptos para su reconversión. En este sentido, para calcular la demanda de camionetas de uso minero, se tomó como referencia la calidad de vehículos que registra

actualmente Codelco y Escondida (1.300 y 1.200 camionetas respectivamente), considerando un total de 5.000 camionetas con un periodo de renovación de 5 años.

De manera similar a la estimación realizada a buses, minibuses y taxibuses, la metodología utilizada para estos equipos consideró el porcentaje esperado para el crecimiento de la minería de cobre en KTPD y el 40% de reconversión inicial. Sin embargo, el cambio anual de camionetas que realizan las empresas mineras es estimado en un 20%⁵⁸, ya que la vida útil de este tipo de vehículos es considerada cada 5 años.

A continuación, se presenta el modelo de reconversión en camionetas, en relación con la estimación de crecimiento de cobre y el supuesto de reconversión:

Gráfico 2. Modelo de reconversión camionetas.



Fuente: Phibrand 2022.

Teniendo en consideración los registros de Codelco y Escondida respecto a la demanda de camionetas, en conjunto con el modelamiento realizado, se estima que para el primer año de reconversión un total de 3.271 unidades, puedan integrar un cambio fuente energética. Al considerar la proyección acumulada para el 2027, se espera que unas 8.916 camionetas puedan ser reconvertidas.

A continuación, se presenta la reconversión esperada por año para camionetas de uso minero de cara al 2027⁵⁹:

⁵⁸ Diferente al caso de buses, que estima un 10% anual.

⁵⁹ la proyección se analiza con un año de desfase, entonces los datos del 2028 corresponde a lo producido en el 2027.

Tabla 9. Reconversión esperada por año para camionetas de uso minero 2027

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Cantidad
	65%	24%	25%	21%	21%	21%	Acumulada
Camionetas	3.271	1.216	1.253	1.043	1.063	1.071	8.916

Fuente: Phibrand 2022.

Cabe destacar, que este porcentaje es susceptible de ser transformado en caso de que surjan kits que aceleren la reconversión de estos equipos.

Respecto a precios, las camionetas aptas para minería en la actualidad tienen precios que van desde los 28 millones de pesos, sin embargo, estos vehículos utilizan diésel como fuente energética. Para los equipos eléctricos, se considera una estimación de precios que varía entre los 50.000 y 100.000 dólares, con un mínimo de 44.000 dólares. Para efectos de cálculo, se consideró que el precio se estabilice en los 50.000 dólares. Teniendo en consideración este factor, se utilizó la misma fórmula para calcular el mercado de reconversión⁶⁰, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 10. Tamaño de Oportunidad en la reconversión de equipos pequeños (camionetas) para cada año, en dólares/año

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total (2022-2027)
Camionetas	148.835.230	55.307.458	57.010.206	47.436.034	48.363.654	48.723.544	405.676.126

Fuente: Phibrand 2022

En base a los datos presentados se espera que para el 2027 el mercado camionetas 4x4 de uso minero alcance unas 8.916 unidades reconvertidas, lo que correspondería a una oportunidad de 405,68 (MUS).

⁶⁰ Fórmula: (Demanda de equipos x año) * (% de reconversión) * (valor equipo al 70% de su CAPEX)

2.2 Reconversión de equipos medianos a eléctricos

En el marco de la estrategia de las compañías mineras por reducir las emisiones de GEI, desde 2019 algunas compañías han estrenado equipos medianos eléctricos que han permitido aumentar su productividad y reducir las emisiones. Se esperaba que la utilización de estos equipos permitiera reducir en un 70% los costos de operación y un 100% las emisiones versus las versiones de diésel convencionales.

Uno de los equipos de apoyo probados por una de las compañías, fue el elevador eléctrico tipo tijera, un equipo alza hombre para la operación en el interior de la mina 100% eléctrico⁶¹. Este equipo permitiría una reducción del costo de operación en un 70%, aumentando la confiabilidad y disponibilidad en un 20% a 30% (menor mantenimiento y mayor vida útil). El gasto energético de la plataforma tijera eléctrica es de 75-149 KW (100-200 hp), reduce el ruido en un 70% respecto de la versión diésel. La reducción en el consumo de diésel es de un 100%, por lo que también contribuye en un 100% a la reducción de emisiones. Respecto al calor liberado, implica una reducción de un 80% a un 90% respecto a la versión diésel.

Por otro lado, la empresa nacional proveedora de buses y taxi buses eléctricos señalada en el apartado precedente, se encuentra en proceso de desarrollar el primer LHD Eléctrico refabricado 100% eléctrico a baterías y se espera que esté operativo durante este año. La empresa plantea que mediante la reconversión de este tipo de equipo de servicio pesado en eléctrico, se lograría un ahorro de recursos naturales y costo de manufactura (economía circular), ahorro de energía y costos de ventilación de minas subterráneas (sin emisiones y libre de material particulado) y un ahorro de problemas y riesgos operativos comparado con maquinaria con cables.

En ese sentido, los proveedores reconocen un cambio en las necesidades de la minería, en la dirección de la electromovilidad y la automatización. En esa línea, visualizan la electrificación de los equipos utilitarios como parte del proceso de validación de tecnologías:

“Sí mira, bien dices tú, a nivel de equipo utilitario que son las grúas horquilla, excavadoras pequeñas, ya hay equipos eléctricos a batería, ya existen. La futura generación de equipos de mediana potencia, creo que el paso siguiente son los bulldozer o los tractores, ahí van a estar los esfuerzos”. (Proveedor)

⁶¹ Guía Minera de Chile (s/f). Codelco estrena equipos mineros eléctricos únicos a nivel global para incrementar su productividad y reducir emisiones de gases. Obtenido de <https://www.guiaminera.cl/codelco-estrena-equipos-mineros-electricos-unicos-a-nivel-global-para-incrementar-su-productividad-y-reducir-emisiones-de-gases/>

Desde la visión de las compañías mineras, los planes actuales apuntan hacia la reconversión o transformación de equipos actuales, más que al recambio de equipos, por 2 factores principalmente:

- a) Aún existen equipos en minería que están en el comienzo o medianía de su vida útil, ya que los períodos de las flotas son más extensos (5 a 10 años):

“Entonces nuestros clientes han estado solicitándonos cómo vamos a ayudarles en la reducción de las emisiones mientras salen las nuevas tecnologías y a su vez cómo nos vamos a hacer parte de la economía circular una vez que lleguen estas nuevas tecnologías y qué vamos a hacer con los equipos que ya están en el mercado [...] Ellos están esperando que de alguna forma estos equipos antiguos -que se transforman en pasivos ambientales-, tengan una segunda vida o sean parte de otro proceso, como materia prima para que se active otro proceso posterior aguas abajo. Ahí es donde nosotros hemos estado más bien reflexionando cómo podemos impactar -desde la remanufactura obviamente-, qué podemos hacer y contribuir algo a estas viejas tecnologías o a las vigentes. Cómo hacerlas más amigables sin pensar en hacerlas carbono neutral, porque ese es un esfuerzo muy grande llevarlos ahí desde la base instalada que tienen, que es un motor diésel a combustión. Ahí se abren otras alternativas que son cómo mejorar la eficiencia de los equipos primero”. (Proveedor)

- b) Menor costo de hacer un retrofeed –cambiar un equipo tradicionalmente mecánico por un equipo diésel-eléctrico intermedio o bien 100% eléctrico- que adquirir uno nuevo:

“Y hoy día el capex de transformar un vehículo eléctrico comparado con comprar uno eléctrico nuevo, es mucho más competitivo también, puede estar en un orden de un 60%-70% del costo de comprar un vehículo eléctrico nuevo” (Proveedor).

Sin embargo, por parte de las compañías mineras todavía se visualizan problemas de desarrollo de la tecnología y disponibilidad de estos equipos, ya que los proveedores ofrecerían soluciones distintas y que muchas veces no son compatibles entre sí en términos de piezas y partes o mantención y reparación. Se espera que exista un desarrollo conjunto entre compañías mineras y proveedores a través de un roadmap tecnológico, cuestión que se está impulsando hoy en día, pero es un proceso incipiente:

“Actualmente se está convirtiendo una pala de Epiroc, pero no se tienen los resultados. Los LHD, por ejemplo, no es llegar y cambiarle el motor y si lo haces estás perdiendo el tiempo porque teni' frenos regenerativos que no vienen en el otro, que te recargan la batería y así tienes

distintas restricciones que hace que el diseño sea bien distinto. No es llegar y cambiar el motor”.

(Compañía Minera)

A continuación, se detalla la metodología utilizada para la cuantificación del nicho descrito y sus resultados. Este nicho contempla los siguientes equipos utilitarios: **rodillo, excavadora, retroexcavadora, motoniveladora, bulldozer, wheeldozer, cargador frontal (LHD) y perforadora de superficie** (Ver Anexo 3).

Para estimar la demanda de los equipos considerados en este nicho se utilizó como referencia el catastro realizado por Minería Chilena⁶². Si bien este catastro fue actualizado por última vez en 2014, es la mejor representación de la cantidad y variedad de equipos utilizados en la industria. Por otro lado, ya que la producción minera actual es similar a la del año 2014 (5700 a 5800 KTPD)⁶³ la cantidad de equipos disponibles entonces es similar a los requeridos en la actualidad.

Cabe destacar, que para calcular la demanda al año 2022 fueron seleccionados solo los equipos con una potencia inferior a 700HP, debido a que los equipos con una potencia mayor no son aptos para una reconversión debido a su alto gasto energético.

A continuación, se expresa la cuantificación en la demanda de los equipos mineros bajo los 700HP para el 2022:

Tabla 11. Demanda de equipos mineros bajo 700HP para 2022

Equipo	Requerimiento 2022
Rodillo	41
Excavadora	190
Retroexcavadora	87
Motoniveladora	254
Bulldozer	408
Wheeldozer	142
Cargador Frontal (LHD)	77
Perforada de superficie	69

⁶²Minería chilena. (2014). Mining Equipment Survey.

⁶³Cochilco (2021) Producción Chilena de Cobre de Mina/ ChileanCopper Mine Production

Fuente: Phibrand 2022.

Para estimar la cantidad de equipos que debiesen ser reconvertidos anualmente, se utilizó el modelo construido en base a la proyección de crecimiento para la minería del cobre, además, del 40% de reconversión inicial (Ver Anexo 4) y la estimación del recambio anual de los equipos con vida útil de 10 años, considerado en un 10%. Obteniendo la siguiente proyección:

Tabla 12. Proyección equipos medianos reconvertidos

Año	2023	2024	2025	2026	2026	2028	Cantidad
	55%	14%	15%	11%	11%	11%	acumulada
Rodillo	22	6	6	4	5	5	47
Excavadora	100	27	29	21	21	22	220
Retroexcavadora	46	12	13	9	10	10	101
Motoniveladora	134	36	38	28	29	29	294
Bulldozer	215	58	51	44	45	47	472
Wheeldozer	75	20	21	15	16	16	164
Cargador Frontal (LHD)	41	11	12	8	9	9	89
Perforada de superficie	36	10	10	7	8	8	80

Fuente: Phibrand 2022.

Continuando con esta proyección, es posible dar cuenta que la cantidad acumulada de equipos reconvertidos para el 2027 sobrepasa la demanda actual para el año 2022. En efecto, es consistente afirmar que al mantener un porcentaje de reconversión anual entre el 11% y 14% - considerando la reconversión inicial estimada en un 40%-, la cantidad actual de equipos medianos que usan diésel estaría reconvertida eléctricamente.

Respecto a precios, para obtener información acerca de los equipos contemplados para este nicho, se utilizaron fuentes de información en base a cotizaciones e información secundaria recopilada de informes de compra minera(Ver Anexo 5), de esta forma se obtuvo información

acerca de los modelos utilizados⁶⁴. Cabe destacar, que los modelos cotizados mantienen un nivel de potencia bajo los 700HP.

A continuación, se presentan los equipos cotizados, indicando precio y modelo:

Tabla 13. Precios equipos mineros medianos

Tipo de Máquina	Modelo	Valor (USD)
Rodillo	Hamn 3410	86.000
Excavadora	336DL	369.900
Retroexcavadora	416E	89.500
Motoniveladora	Cat 140K	250.818
Bulldozer	Cat D6T	320.900
Wheeldozer	814F	431.250
Cargador Frontal (LHD)	966GC	350.000
Perforada de superficie	CS3000	178.100

Fuente: Phibrand 2022.

Al considerar la capacidad de electrificar estos equipos, es correcto destacar que en la actualidad no se encuentran disponibles en un formato comercial, ya que estos aun no cumplen con los estándares adecuados para su fabricación. Más bien, actualmente se trabaja en testeos de prototipos que buscan identificar cuáles tecnologías serán priorizadas para su producción. En base a este factor, para obtener información acerca del valor que podrían tener estos equipos, se extrapoló el valor a partir de equipos que actualmente cuentan con versión eléctrica, a saber: grúa horquilla, buses y pickup. De esta forma, se estima que el valor de un equipo mediano y eléctrico nuevo es 1,66 veces más alto que un equipo diesel. No obstante, el proceso de reconversión de estos equipos a su versión eléctrica puede estimarse considerando que un equipo reconvertido es el 70% del CAPEX de un equipo en versión diesel convencional.

Considerando esta estimación, para calcular el tamaño de oportunidad, se utilizó la proyección en la demanda de estos equipos al 2022, considerando el crecimiento en la minería del cobre y el factor de reconversión. En la Tabla 14 se presenta la proyección obtenida, la cual brinda

⁶⁴Zanlungo, J. Braga, I. (2015). Análisis de determinación del tamaño óptimo del negocio minero, caso evaluación para gran minería a rajo abierto.

información acerca de los equipos considerados para su reconversión, la proyección anual en el mercado de reconversión y también el tamaño en la oportunidad acumulada hasta el 2027.

Tabla 14. Tamaño de oportunidad en la reconversión de equipos medianos para cada año, en dólares/año

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total (2022-2027)
Rodillo	2.168.356	588.706	619.495	446.374	463.147	469.655	4.755.733
Bulldozer	80.515.269	21.859.778	23.003.040	16.574.735	17.197.559	17.439.197	176.589.579
Excavadora	43.220.153	11.734.209	12.347.905	8.897.226	9.231.555	9.361.265	94.792.314
Motoniveladoras	39.177.867	10.636.734	11.193.033	8.065.088	8.368.148	8.485.726	85.926.596
Retroexcavadora	4.788.403	1.300.044	1.368.036	985.732	1.022.773	1.037.144	10.502.132
Wheeldozer	37.658.743	10.224.294	10.759.022	7.752.364	8.043.673	8.156.692	82.594.788
Perforadora superficie	7.557.208	2.051.771	2.159.771	1.055.714	1.614.172	1.636.853	16.574.796
Cargador frontal (LHD)	16.573.229	4.499.608	4.734.936	3.411.736	3.539.938	3.589.677	36.349.125

Fuente: Phibrand 2022.

2.3 Reconversión de equipos medianos a combustibles sintéticos

Los equipos medianos o de apoyo pueden ser reconvertidos utilizando combustibles diésel alternativos, como es el diésel sintético o mezclas, o electrificarse. Desde la perspectiva de la operación minera, no hay diferencias en tanto la operación es similar en ambos casos. Sin embargo, entendiendo que hay una promesa de transición hacia la electromovilidad y reducir la dependencia de combustibles fósiles, este nicho de reconversión se observa como temporal. Los modelos híbridos gastarían un 30% menos y emitirían un 25% menos de gases⁶⁵.

En línea con las pruebas realizadas por algunas compañías mineras para reducir sus emisiones y costos de operación, en abril del 2019, se integró a una de las divisiones de minería subterránea el primer LHD híbrido (18HD) de la industria minera mundial -un equipo de carga, transporte y descarga de mineral en el interior de la mina -. Este equipo es híbrido, ya que tiene un accionamiento eléctrico, no tiene caja de cambios ni filtros y solo utiliza diésel para la generación de energía motriz. Este equipo esperaba una mayor productividad (10 a 20%) y una reducción de costos de operación de un 30%. Respecto a su confiabilidad y disponibilidad, esta es de 10% a 20%, ya que demandaría menos horas de motor, una mayor vida útil y su reemplazo de componentes es más fácil. Respecto al consumo de diésel, reduciría sobre un 25% y las emisiones y el calor liberado en un 25% o más⁶⁶.

Hasta el 2021, este LHD híbrido había conseguido promedios de productividad, reducción de combustible y disponibilidad mecánica mayores a los esperados. Consiguió una cifra de 49% de productividad por sobre la meta definida en el protocolo de prueba industrial. Respecto al costo por tonelada producida, este fue menor, impactando de manera positiva en esa área. Los indicadores asociados a la mantención del equipo, lograron un MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) por sobre la meta y un MTTR (Tiempo Medio Para Reparar) menor a la meta definida⁶⁷. Estos resultados se consiguieron gracias a la Tecnología Híbrida Electromóvil, ya que el equipo mantiene un motor diésel junto a un generador, el cual alimenta cuatro motores eléctricos ubicados en las ruedas, complementado con la unidad KESS (*Kinetic Energy Storage System*).

El sistema KESS se utiliza en el equipo como un almacenador de energía cinética y que se utiliza para aumentar los caballos de fuerza de la máquina. Los cargadores convencionales utilizan la potencia del motor a diésel tanto para la propulsión de la máquina como para el sistema hidráulico de carga y descarga. El sistema aprovecha la energía de frenado del equipo, donde esta se recupera y se envía a la unidad KESS que la almacena. En un equipo convencional, los promedios de potencia de los motores son de alrededor de 400 HP para mover

⁶⁵ Ídem

⁶⁶ Ídem

⁶⁷ Komatsu Latinoamérica (2021). Komatsu consolida resultados de su primera pala híbrida para minería subterránea en Chile. Obtenido de <https://www.komatsulatinamerica.com/chile/grupo-komatsu-cummins-consolida-resultados-de-su-primera-pala-hibrida-para-mineria-subterranea-en-chile/>

un equipo de esas características. La unidad KESS es capaz de incorporar una potencia de 550 HP, permitiendo que el motor diésel se mantenga en una menor revolución, disminuyendo el consumo de combustible. Con esto se transforma el equipo en una máquina de 950 HP, al combinar la potencia del motor diésel con el equipo KESS⁶⁸.

En el caso de los combustibles sintéticos, si bien estos no son cero emisiones, son carbono-neutrales, por lo que se visualizan como útiles para ir transitando y como un paso intermedio para la reducción de emisiones con la flota actual. Sin embargo, se reconoce que estos pueden formar parte de la solución final, en tanto esta no se basará solo en un vector energético, sino en una matriz energética enriquecida por distintos tipos de combustibles mucho más limpios que los actuales, de modo que la tecnología dirá cual tiene que desaparecer, es decir, la demanda determinará la producción. En ese sentido, no se descartan los combustibles sintéticos como el bio-diésel, el HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) se ve como una opción atractiva, porque ya se fabrica y la demanda puede escalar porque requiere pocos cambios a las refinerías y la mayoría de los motores ya vienen certificados para poder funcionar con HVO. Si bien no es cero emisiones, se puede hacer *blending* con diésel convencional y aquello resulta más rentable. Una de las compañías mineras se encuentra haciendo pruebas en Australia de distintos equipos mineros con HVO para probar si funcionan igual o similar a equipos diésel.

En ese contexto, un combustible que aparece como relevante, es el diémetil éter (DME). Este es un gas limpio e incoloro que es fácil de licuar y transportar y tiene potencial para ser utilizado como combustible equipos o vehículos, para la generación de energía y en aplicaciones industriales y domésticas. El DME puede derivarse de muchas fuentes, incluidas materias primas renovables (biomasa, desechos, residuos agrícolas y forestales) y combustibles fósiles (gas natural y carbón). Actualmente, se está explotando cada vez más para su uso como un combustible alternativo ultralimpio y un portador de energía.

Al igual que el LPG/propano, el DME es gaseoso a temperatura y presión normales, pero cambia a líquido cuando se lo somete a una presión o enfriamiento moderados. Esta fácil licuefacción hace que el DME sea fácil de transportar y almacenar. Estas y otras propiedades, incluido un alto contenido de oxígeno, la falta de azufre u otros compuestos nocivos y la combustión ultra limpia, hacen de DME una solución versátil y prometedora en la mezcla de combustibles renovables limpios y bajos en carbono.

La producción mundial actual se realiza principalmente por medio de la deshidratación del metanol, pero también se puede fabricar directamente a partir del gas de síntesis producido por la gasificación del carbón o la biomasa, o mediante el reformado del gas natural. Entre los diversos procesos de conversión química del gas natural, la síntesis directa de DME es el más eficiente. Además, el DME ofrece el mismo rendimiento y eficiencia energética que el combustible diésel y no genera hollín.

⁶⁸ ídem

No obstante, un factor a considerar es que, para producir DME verde, se debe utilizar CO₂ extraído de la atmósfera o que ya se encuentre compensado, como es el caso de usar hidrógeno verde para producirlo. Esto tiene un costo de producción elevado, a diferencia de su versión gris, que no requiere compensación de las emisiones. Se estima que el costo del DME verde es aproximadamente 3 veces más caro que el gas licuado, que tiene un precio similar al petróleo. El mayor costo está dado por el proceso de extracción de carbono de la atmósfera que requiere la generación de la molécula de DME, además de su almacenamiento y transporte. Nuevamente, la demanda de combustibles sintéticos va a depender de su precio. Si bien actualmente existen impuestos al CO₂ que se están discutiendo con una probabilidad alta de ser implementados y actualmente existe una mayor disposición a pagar por productos carbono neutrales, es un escenario que está en proceso.

A nivel general, se visualiza que existirá una convivencia de diferentes tecnologías entre flotas antiguas y nuevas: equipos diésel-eléctricos -con todos los mandos eléctricos, pero con un motor generador-, tecnologías híbridas de generadores, baterías y mandos eléctricos -diésel-eléctricos pero con algo de baterías que hacer que los motores puedan ser más pequeños y consuman menos combustibles-.

Se espera que la migración comience desde los contratistas mineros primero con equipos pequeños y luego con la sustitución –al final de la vida útil- de los equipos de producción. Actualmente, existen proveedores de equipos convertidos, por ejemplo con gas natural –sustituyendo el 70% del diésel-, los cuales si bien siguen siendo combustibles fósiles, reducen la huella de carbono y representan una mejora desde el punto de vista operacional. Sin embargo, la población de equipos es reducida comparado con el contexto internacional, pero se observa que existe cada vez más disponibilidad:

“Entonces, todo lo que es investigación y desarrollo no está en nuestras manos, pero si vemos cada vez más productos que están saliendo al mercado para cubrir esta necesidad diésel-eléctrico. Desde bulldozers, motoniveladoras, excavadoras y los camiones que tienen un poco más de años” (Proveedor)

Con respecto a las condiciones habilitantes para que los equipos pasen a la reconversión, cabe destacar que para el uso de combustibles sintéticos no se requiere un cambio de tecnología, ya que se pueden usar directamente en los motores de combustión interna que existen en las distintas aplicaciones del transporte y la industria. En la mayoría de los casos, no se requiere hacer ningún tipo de conversión ni añadir una tecnología adicional al equipo para que funcione con combustible sintético en lugar de diésel convencional.

En general, los motores diésel fueron diseñados originalmente para funcionar con una amplia variedad de combustibles diferentes, y fue sólo más tarde que el diésel de petróleo se convirtió en la norma. Los combustibles sintéticos líquidos y gaseosos son fáciles de almacenar y transportar, ya que se utiliza la misma infraestructura, logística y puntos de distribución que hoy ya existen para los combustibles fósiles. Desde el punto de vista químico, son hidrocarburos puros y por ello se pueden utilizar directamente en los motores de combustión interna, sin cambios importantes en el diseño del motor⁶⁹.

A continuación, se detalla la metodología utilizada para la cuantificación del nicho descrito y sus resultados. Este nicho contempla los siguientes equipos utilitarios: **bulldozer, WheelDozer y perforadora de superficie**. Los equipos medianos, menores a 700 HP, no son considerados dentro de este nicho ya que pueden ser electrificados.

Al igual que el nicho anterior, con el fin de obtener información acerca de la demanda en equipos medianos utilizados al año 2022, se realizaron estimaciones en base al catastro elaborado por Minería Chilena⁷⁰. No obstante, a diferencia de los equipos señalados en el nicho anterior, para el caso de equipos como el bulldozer, wheeldozer y perforadora de superficie, su capacidad puede superar los 700HP. En efecto, su reconversión eléctrica se vuelve inviable, debido a que la potencia de las baterías eléctricas no trabajaría de manera eficiente con equipos de alta potencia. Considerando este factor, los equipos medianos que superen los 700HP pueden ser candidatos a una reconversión mediante el cambio de combustible diésel a un combustible sintético ya que debido a su alta potencia, no son candidatos para una reconversión eléctrica.

En base a lo anterior y de manera similar a los nichos cuantificados previamente, se buscó cuantificar la demanda de los equipos al año 2022. La demanda con los datos extrapolados del catastro⁷¹ es de 24 unidades para bulldozer, 15 para wheeldozer y 152 para perforadora de superficie. Una vez realizada la cuantificación de estos equipos, se buscó estimar la cantidad anual de equipos que podrían experimentar un cambio de combustible. Para ello, fue utilizado el modelo de proyección respecto al crecimiento en la minería de cobre (Ver Anexo 4), obteniendo lo siguiente:

Tabla 15. Proyección equipos medianos reconvertidos combustibles sintéticos

Año	2022	2023	2024	2025	2026	2026	2028	Cantidad
-----	------	------	------	------	------	------	------	----------

⁶⁹ Universidad Autónoma de Chile (s/f). Combustibles sintéticos: transición a nuevas tecnologías limpias. Centro de Comunicación de las Ciencias. Obtenido de: <https://ciencias.uautonoma.cl/noticias/combustibles-sinteticos-transicion-a-nuevas-tecnologias-limpias/>

⁷⁰ Minería chilena. (2014). MiningEquipmentSurvey

⁷¹ Ídem.

	Demanda actual	55%	14%	15%	11%	11%	11%	Acumulada
Bulldozer	24	13	3	4	3	3	3	28
Wheeldozer	15	8	2	2	2	2	2	18
Perforadora de superficie	75	42	11	11	8	8	9	89

Fuente: Phibrand 2022.

En base a estos datos, si se considera la demanda actual (2022) de los equipos sobre 700HP que usan diésel, es posible establecer que para el año 2027 la demanda total de estos equipos podría tener incorporado el uso de biocombustible. Sin embargo, esta proyección es consistente mientras la reconversión anual de equipos pueda ser entre el 15% y el 11%, con un recambio inicial del 55%.

Respecto a precios, se obtuvo información por medio de cotizaciones y reportes de compra (Ver Anexo 5) de los equipos, permitiendo así poder identificar los modelos utilizados por las faenas mineras y que fueran sobre los 700HP, obteniendo la siguiente información:

Tabla 16. Precios equipos medianos mineros sobre los 700HP

Tipo de Máquina	Modelo	Valor (USD)
Bulldozer	D11R	\$ 320.900
Wheeldozer	854K	\$ 431.250
Perforadora superficie	MD6640	\$ 930.500

Fuente: Phibrand 2022.

Para estimar el tamaño de mercado de estos equipos, se consideró que un equipo reconvertido con biocombustible es el 70% del CAPEX de un equipo diesel. Asimismo, se utilizó la proyección en la demanda de estos equipos al 2022, considerando el crecimiento en la minería del cobre y el factor de reconversión anual antes señalado (Ver Anexo 4), obteniendo la siguiente proyección:

Tabla 17. Tamaño de Oportunidades en la reconversión de equipos medianos sobre 700HP para cada año, en dólares/año

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total (2022-2027)

Bulldozer	6.189.161	1.598.152	1.681.735	1.211.766	1.257.301	1.274.967	13.213.081
Wheeldozer	5.198.418	1.342.324	1.412.528	1.017.790	1.056.035	1.070.874	11.097.969
Perforadora superficie	56.082.641	14.481.539	15.238.921	10.980.334	11.392.939	11.553.018	119.729.393

Fuente: Phibrand 2022.

En este caso, es posible obtener información acerca de los equipos considerados para su reconversión, la proyección anual en el mercado de reconversión y también el tamaño en la oportunidad acumulada hasta el 2027.

Cabe destacar dentro de las oportunidades de este nicho de reconversión, el uso del dimetil éter (DME) como remplazo del diésel. El uso de este compuesto, como un derivado del gas natural o la biomasa, tiene propiedades detonantes que le permiten tener una reacción similar a la gasolina diésel⁷². Sin embargo, el uso del DME cuenta con ventajas medioambientales que lo convierten en una mejor opción que el diésel, ya que sus emisiones de humo y partículas contaminantes como el NOx se mantienen en niveles bajos.

Dicho esto, la oportunidad radica en el establecimiento de plantas de DME en regiones que registren un alto consumo de combustible y/o cercanas a grandes yacimientos mineros. De esta forma, se realizó un mapeo que permitió establecer que las regiones del norte de Chile, específicamente Tarapacá, Antofagasta y Atacama, son actualmente las zonas donde más combustible se utiliza. En efecto, la producción de DME como un combustible alternativo al diésel tendría un mercado con mayor posibilidad de demanda.

Para dar consistencia al modelamiento antes realizado, se utilizó la proyección del crecimiento del cobre al 2027 para estimar el consumo de combustible de las principales regiones del centro y norte del país. A continuación, se presenta la proyección en el consumo de combustible:

Tabla 18. Distribución del Consumo de DME por Región y Año (m3)

	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Arica y Parinacota	170	38	36	20	-	-
Tarapacá	15,252	4,397	4,831	3,776	3,684	3,672
Antofagasta	74,172	18,833	19,163	13,550	14,274	14,300
Atacama	16,647	4,533	5,000	3,601	3,625	3,785
Coquimbo	9,481	2,413	2,618	1,886	1,852	1,935
Valparaíso	5,511	1,313	1,442	997	1,249	1,427

⁷²Aga Van Zeebroeck. R. El dimetil éter (DME) como nuevo combustible diésel limpio. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/293740948_El_dimetil_eter_DME_como_nuevo_combustible_limpio

Metropolitana	7,409	1,823	1,959	1,413	1,567	1,399
O'Higgins	7,110	1,703	1,838	1,336	1,327	1,447

Fuente: Phibrand 2022.

No obstante, si bien el uso de DME logra ser una alternativa al diésel que favorece al cuidado del medioambiente, cabe destacar que al estimar el consumo de DME requerida para los equipos medianos sobre los 700HP este es aproximadamente el doble del consumo en base a diesel. Es decir, un equipo que utiliza DME rinde 28.4 MJ/kg, mientras que la versión diesel 42.5 MJ/ kg.

2.4 Mantenimiento y reparación de equipos pequeños y medianos

La transformación de la industria minera hacia la automatización y digitalización implicará capacidades distintas en términos de mantenimiento para esta futura generación de equipos. En ese sentido, observamos este nicho como una oportunidad de negocio derivada de los nichos anteriores.

Como ya se mencionó, la industria minera en Chile es un comprador de soluciones, buscando minimizar la utilización de recursos internos, externalizando en proveedores y contratistas una parte importante de los procesos que no se relacionan directamente con la extracción y procesamiento de minerales. En esa línea, se espera que sean los proveedores quienes asuman la responsabilidad de entregar estos servicios de mantención, reparación y actualización de los nuevos equipos o bien, empresas nacionales dedicadas a producir y/o comercializar repuestos, piezas y partes o servicios de mantención y reparación.

Los proveedores entrevistados, manifiestan que a través de los convenios de mantención y reparación establecidos con empresas mineras brindan soporte a cualquiera de los equipos existentes, por lo que cuando estos nuevos equipos sean comercializados, ya sea en formato de arriendo o *leasing*, serán ellos quienes buscarán este tipo de soluciones. Algunos proveedores tienen unidades que se encargan de prestar ayuda en distintos niveles de soporte a clientes o todo lo relacionado con garantías:

“Entonces obviamente acá cuando viene una nueva tecnología que se implanta acá, tenemos metodología, un modelo de desarrollo de implementación que se llama NPI, New Product Introduction. Entonces ese modelo, cada vez que hay una solución nueva se pasa por ese proceso y nuestros especialistas acá en Chile en distintos niveles se capacitan y se especializan. Por lo tanto todo lo que es el soporte propiamente tal que va a haber a los futuros equipos

nuestros -independientemente sean de mina de cielo abierto o subterránea o alguna nueva tecnología que venga-, nosotros nos capacitamos y nosotros damos el soporte directamente acá en Chile” (Proveedor)

Respecto a los costos de mantención, los equipos eléctricos tienen menos partes móviles y según los pilotos realizados se ha podido validar que tendrán un costo de mantención menor y aquello hace que el cambio sea más atractivo. No obstante, en términos de capital humano implicaría cambiar la proporción de las cuadrillas de mecánicos, ya que cambia el perfil de los profesionales que se necesitan. Por ejemplo, ya que son equipos de alto voltaje, potencia compleja, digitales, implican manejo y procesamiento de datos, comunicación y conectividad, etc. También se requiere personal certificado para poder hacer las maniobras de operación de los componentes de potencia del vehículo, por lo cual es importante empezar a crear estos incentivos y programas ad hoc para impulsarlo:

“Toda la gente que hoy día se dedica a reparar motores diésel se tiene que reconvertir en algo, entonces no vamos a esperar que los motores desaparezcan, tenemos que ir moviéndonos hacia allá poco a poco para reconvertir nuestras capacidades humanas como capital humano disponible en el soporte a estos equipo hacia las nuevas tecnologías que debieran llegar”
(Proveedor)

Los proveedores manifiestan que en los últimos años, se han ido introduciendo nuevas competencias de mantenimiento y reparación para la futura generación de equipos, de manera que el personal está cada vez más preparado para el trabajo con nuevos equipos eléctricos y nuevas soluciones:

“Y la mano de obra, por ejemplo, la mano de obra también ha ido mutando, los primeros mantenimientos grandes que hacíamos, overhall, venía mucho alemán, gringo, etc., y hoy día en verdad tenemos un overhall pronto y viene un par de personas del extranjero no más, así que hemos también nosotros ido cambiando y hemos ido adquiriendo ese conocimiento aquí. Hoy día ya no necesitamos tanto soporte, hace ya no sé ocho años atrás que ya no necesitamos el soporte que necesitábamos al comienzo”. (Proveedor)

La cuantificación de este nicho tiene como objetivo estimar las oportunidades en el mercado de mantenimiento de equipos pequeños y medianos, ya sean reconvertidos a eléctricos o eléctricos desde su fabricación. La principal diferencia entre el mantenimiento de vehículos eléctricos y el mantenimiento diésel, es que los primeros requieren más inspecciones y comprobaciones visuales, en comparación con el mantenimiento diésel que incluye repuestos y reemplazo de fluidos. Cabe destacar que se excluyen de este nicho el mantenimiento de equipos que funcionen con biocombustible, debido a que su mantenimiento es esencialmente similar al de equipos diésel actuales.

En el caso de los equipos reconvertidos a eléctricos, una de las actividades de mantenimiento más comunes para los autobuses eléctricos es la revisión de la batería. Estos controles generalmente no son invasivos ni requieren mucho tiempo. Incluso, a veces se automatizan con mensajes de diagnóstico. Por lo general, estas comprobaciones se realizan en intervalos regulares de mantenimiento preventivo, con lo cual se observan los niveles de humedad o la información de temperatura anterior para ver si ha ocurrido algún problema reciente.

Dicho esto, para generar estimaciones acerca del mercado de mantenimiento, se tomó en consideración la proyección de los equipos reconvertidos hasta el año 2027, en conjunto con el costo de mantención de por hora. Para obtener esta información se consultaron los precios en el servicio de mantenimiento de la empresa Finning Cat (Ver Anexo 6). Paralelamente, se consideró un promedio de 20 horas de uso diario de cada equipo, lo que permitió obtener información acerca del costo anual para el mantenimiento de cada equipo, obteniendo la siguiente fórmula:

Costo mantenimiento anual:

$$(\text{Valor hora de mantenimiento USD}) * 20 * 365$$

De acuerdo con esta fórmula, a continuación, se presentan los equipos, su proyección en demanda reconvertida al 2027 y costo de mantenimiento por hora y anualmente:

Tabla 19. Costos de mantenimiento equipos pequeños y medianos eléctricos y reconvertidos

Equipo	Equipos reconvertidos 2027	Costo Mantención Valor x hora (USD)	Costo Mantención Anual (USD)
Bus	2.781	2,47	18.062
Minibús y taxibuses	1.183	1,64	12.000
Camioneta	8.916	1,64	12.000
Rodillo	47	5,57	40.661
Retroexcavadora	101	17,81	130.013
Motoniveladoras	294	12,24	89.352
Bulldozer	472	15,58	113.734
Excavadora	220	17,81	130.013
Wheeldozer	164	18,63	135.999
Perforadora superficie	80	18,63	135.999
Cargador frontal (LHD)	89	15,58	113.734

Fuente: Phibrand 2022.

Teniendo claridad acerca de los costos del mantenimiento de cada equipo reconvertido, se procedió a estimar el tamaño de mercado anual. Para ello, se tomó como referencia la proyección en la demanda de reconversiones anuales de cada equipo⁷³ y el costo de mantenimiento anual:

Tabla 20. Mantenimiento acumulado de equipos pequeños y medianos para cada año, en dólares/año

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total (2022-2027)
Bus	23.524.024	6.074.323	6.392.009	4.605.733	4.778.801	4.845.946	50.220.835
Minibús y taxibus	6.650.649	1.717.316	1.807.132	1.302.120	1.51.050	1.370.033	14.198.301
Camioneta	39.253.247	14.586.582	15.035.659	12.510.602	12.755.249	12.850.166	106.991.506
Rodillo	878.746	238.578	251.056	180.897	187.695	190.332	1.927.304
Bulldozer	27.960.731	7.591.298	7.988.321	5.755.948	5.972.238	6.056.152	61.324.688
Excavadora	8.948.690	2.429.556	2.556.622	1.842.162	1.911.384	1.938.241	19.626.655
Motoniveladora	15.227.395	4.134.216	4.350.434	3.134.685	3.252.477	3.298.176	33.397.383
Retroexcavadora	5.962.215	1.618.733	1.703.392	1.227.371	1.273.492	1.291.385	13.076.588
Wheeldozer	10.179.481	2.763.714	2.908.256	2.095.530	2.174.274	2.204.824	22.326.079
Perforadora superficie	11.756.584	3.191.895	3.358.831	2.420.190	2.511.133	2.546.416	25.785.049
Cargador frontal (LHD)	4.616.179	1.253.286	1.318.832	950.279	985.987	999.841	10.124.403

Fuente: Phibrand 2022.

⁷³Proyecciones en la demanda anual de equipos realizadas en cada uno de los nichos, considerando el crecimiento de la minería de cobre y el recambio anual de equipos.

3. Barreras para la transición energética a corto y mediano plazo

En base a las entrevistas realizadas, en el presente apartado se exponen las principales barreras para la transición energética percibidas por los representantes de las compañías mineras y proveedores del sector en un horizonte temporal de corto y mediano plazo (2023-2027).

En primer lugar identificamos barreras que refieren a aspectos técnicos que presentaría la adopción de nuevas tecnologías, ya sea la incorporación de nuevo equipamiento, el cambio de combustibles, etc. La primera de ellas, refiere a una insuficiencia de instancias de pilotaje y validación de tecnologías, ya que el realizar innovaciones directamente en las minas provoca interferencias con los procesos productivos. Desde el punto de vista de los proveedores y en base a datos elaborados por Cochilco⁷⁴, podemos constatar que una de las mayores barreras para desarrollar innovación en minería por parte de las empresas proveedoras es la resistencia de la industria minera para incorporar productos o servicios no probados, lo cual puede ser un obstáculo para la transición y el avance tecnológico y de alguna manera, desincentivar a los proveedores con capacidades de innovar en el sector. Una segunda barrera en este ámbito tiene que ver con el bajo nivel de absorción tecnológica respecto a la transición energética, lo cual se traduce en una baja oferta local de equipos y soluciones. En relación al capital humano, la adopción de nuevas tecnologías requiere de capacitación y de nuevos perfiles profesionales.

En segundo lugar, nos referimos a obstáculos relacionados con la factibilidad económica que representa este proceso, ya que las compañías mineras y proveedores relevan este aspecto como algo central que limita la adopción de nuevas tecnologías o la innovación. Esto tiene relación con que las compañías mineras buscan maximizar la producción y minimizar los costos, disminuyendo los riesgos que significa innovar en procesos, sistemas, tecnologías no probadas y formas organizacionales. En segundo lugar, visualizamos un desfase entre las intenciones manifestadas por las compañías mineras en contribuir a una industria más limpia reduciendo sus emisiones y los recursos destinados a este propósito. Una tercera barrera es que ni las compañías mineras ni los proveedores están totalmente dispuestos a realizar la inversión que

⁷⁴Cochilco (2020). Encuesta de Innovación en Empresas Proveedoras de la Gran Minería. 5ta Versión. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Encuesta%20de%20Innovacion%202020%20VF%20RPI.pdf>

implica fabricar o reconvertir equipos, ya que no existen los incentivos suficientes para ello. Según datos de Cochilco⁷⁵, desde el punto de vista de los proveedores, los factores asociados a los costos y al mercado son percibidos como las mayores barreras a la innovación.

En tercer lugar, visualizamos la existencia de barreras vinculadas a aspectos culturales propios de las organizaciones y del sector minero que limitarían la transición, específicamente, una baja disposición a la innovación por parte de las empresas.

3.1 Barreras técnicas

Una primera dimensión de las barreras técnicas percibidas para la transición energética son las insuficientes instancias de pilotajes y pruebas para la validación de nuevas tecnologías, condición habilitante para haciendo ajustes a los equipos y posteriormente hacer el escalamiento. Estas instancias serían fundamentales para ir incorporando paulatinamente vehículos o equipos de apoyo a la producción e ir reemplazando las flotas actuales, pero que aquello no implique pérdidas en términos de producción:

“Hay que probar las tecnologías, validarlas, pilotearlas. Y con esa validación en mano empezar a escalar. Así es como funciona un poco la metodología de trabajo que tenemos acá [...] para evitarnos todo ese problema queremos hacer las cosas de manera paulatina.” (Compañía Minera)

Fortalecer las instancias de pilotaje, habilitaría desarrollar estas tecnologías y adaptarlas a lo que efectivamente necesita la industria en un equipo particular. Por ejemplo, las pruebas en minas representativas del sector en términos de infraestructura y condiciones físicas pueden ayudar a replicar las soluciones en otras minas. Sin embargo, aún existe cierta rigidez en los criterios que exigen las mineras respecto a las características que deben tener los equipos:

“Nosotros hicimos en algún momento un estudio de rutas internas y fijate que una camioneta en una de las compañías no necesitaba más de 60 km diarios y la parte cara de la camioneta eléctrica es las baterías, por lo tanto, si tú lo que haces es producir por ejemplo, una camioneta para querer cubrir las 400 o 500 o 600 kilómetros que cubre la camioneta convencional, por supuesto que el precio se te va a las nubes [...] Entonces es un tema de flexibilidad también”.
(Compañía Minera)

La validación de tecnologías no solo implica ir aprendiendo si los equipos funcionan en la fábrica o fuera de la mina en términos de potencia, sino validar su filosofía operacional y los impactos

⁷⁵ ídem

que tiene este en términos de desempeño, seguridad, manipulación de baterías y productividad dentro de la mina:

“Entonces, nosotros estamos incorporando en [división compañía minera] un bus eléctrico -un taxi bus de hecho-, mina que tiene muchos problemas de polvo en suspensión, lo que se llama chusca. Hay mucha chusca allá y hasta a los mismos buses diesel se les hace más mantención porque se contamina bastante. Entonces no sabemos cómo se comportaría, este año lo vamos a ver para ver si al año que sigue podemos incorporar más flota eléctrica” (Compañía Minera)

El desafío de las compañías mineras es que la transición energética no tenga impactos en la productividad, es decir, que el proceso no signifique disminuir los ciclos de trabajo o un retroceso con respecto a los equipos convencionales. Además, en el sector minero el modo de producción es continuo, lo que hace difícil detener un proceso para probar nuevas tecnologías y los estándares de seguridad:

“Mira, la tecnología que estamos probando... te voy a dar un ejemplo. La pala eléctrica la vamos a probar 2 meses en turno a, 2 meses en turno a y b, y 2 meses en turno a,b y c (día completo) y lo vamos a hacer así pa’ ir aprendiendo de a poco. Ahora, esa pala como es una prueba no tiene compromisos productivos, no estamos parando una pala para poner esta, por tanto la pala no va a interferir, no vamos a perder producción por eso. Ese es uno de los problemas que tenemos, porque mientras más tecnología querai’ probar, menos tenís que interferir con la operación actual. Han surgido algunas ideas tales como tener una mina de prueba, que te podría ayudar mucho a probar tecnologías sin necesidad de interferir, pero eso es algo que todavía está... ni si quiera ha nacido, está ultra verde”. (Compañía Minera)

En esa línea, todavía se observan problemas en los equipos que requieren de mayor disponibilidad y rendimiento, es decir, en los equipos de producción, que son los de mayor utilización. En el caso de los equipos eléctricos, solo han sido probados y validados los que son anexos o requieren de menor autonomía, ya que para brindar una mayor autonomía se requiere una mejor densidad energética de las baterías, tecnología no disponible en la actualidad. Con respecto a la infraestructura necesaria para cumplir con los períodos de carga, hoy en día las operaciones están alejadas de puntos de entrega de energía eléctrica rápida y aquello dificulta cumplir con los ciclos de producción. En ese sentido, diagnosticamos una baja absorción tecnológica en torno a la transición que se traduce en una baja oferta local de equipos y soluciones:

“Entonces no sé, yo creo que falta todavía, falta como no sé, si estamos hablando de cambiar la tecnología en la operación va a ser más difícil, pero sí para temas como anexos. Que son como

más indirectos de la operación, yo creo que ahí es más fácil, hay más oportunidades” (Compañía Minera)

Una segunda barrera refiere al capital humano, ya que el cambio de equipos va a significar capacitar a las personas porque son tecnologías nuevas e implican ir generando aprendizajes en el proceso. Por ejemplo, el personal mecánico va a ir necesitándose cada vez menos y se necesitará personal experto en el área electrónica, lo cual no solo requiere capacitación, sino ir generando normativas internas y normativas nacionales desde el punto de vista de seguridad, salud y contingencias a abordar. En ese sentido, la transición energética presenta además de dificultades tecnológicas, cambios culturales que son difíciles de realizar en el sector minero, lo que implica que los cambios en las operaciones deberán ser implementados “cuidadosamente”:

“Ahora, tú pones un combustible nuevo que es la electricidad para un uso que no se le estaba dando y que es cargar vehículos ¿Tú te imaginas lo que va a ser el cambio radical para muchas personas el querer bajarse un día que está lloviendo a agarrar el conector y enchufarlo? Aunque le esté diciendo el jefe de seguridad de la organización “Tranquilo esto tiene una cantidad de sistemas de control que no va a fallar nunca”. Y efectivamente no va a fallar, pero hay una barrera cultural que ahí vamos a tener que romper absolutamente.” (Compañía Minera)

Estos cambios culturales se perciben como otra de las condiciones habilitantes que van a permitir utilizar las nuevas tecnologías y aquello se vislumbra como un proceso lento, incluso más que el desarrollo de las mismas tecnologías por parte de los OEM y fabricantes. Sin embargo, desde el punto de vista de los proveedores, el capital humano se ha ido desarrollando en los últimos años y como se mencionó en los capítulos precedentes, los equipos eléctricos suelen tener una baja complejidad en términos operativos. No obstante, se requerirá cierta especialización y certificación por parte del personal que manejará y mantendrá los equipos:

“Entonces, puede cambiar un poco pero debería ser más fácil la conducción. En términos de mantención si cambia un poco, porque ahora hay que trabajar con alto voltaje, entonces se requiere personal certificado en trabajo con alto voltaje para poder hacer las maniobras de operación de los componentes de potencia del vehículo. Entonces en ese caso si se requiere una especialización mayor...” (Proveedor)

Respecto a los proveedores mineros, Cochilco⁷⁶ identifica a estos actores como un actor especialmente relevante en el desarrollo de la actividad minera en Chile, dada la capacidad y potencial que tienen en la creación de valor. De los resultados obtenidos en la “Encuesta de Innovación en Empresas Proveedoras de la Gran Minería” (2020) -que tuvo como objetivo caracterizar a empresas proveedoras de la gran minería del cobre en temas relacionados con

⁷⁶ Ídem

innovación⁷⁷-, se destaca como la principal barrera para la innovación, la resistencia de la industria minera para incorporar productos o servicios no probados, lo cual constata los datos obtenidos de las entrevistas. Al agrupar las distintas barreras a la innovación por tipo de factor, se obtuvo:

Gráfico 4. Barreras a la innovación según proveedores de la minería



Fuente: Cochilco 2020.

En ese sentido, asumir riesgos no controlados que puedan afectar la productividad puede ser un obstáculo para la transición y el avance tecnológico y desincentivar a los proveedores con capacidades de innovar en el sector minero. Otros de los impedimentos para innovar percibidos por los proveedores, se encuentran relacionados con las barreras culturales y económicas que serán tratadas a continuación y refieren a la falta de cultura de innovación y los altos costos para innovar. La falta de información sobre los mercados y tecnologías no fue percibido como un impedimento para innovar o una barrera.

⁷⁷ La encuesta analizó las respuestas de 98 empresas proveedoras de la minería, pertenecientes a 7 regiones del país.

3.2 Barreras económicas

Desde el punto de vista económico o de factibilidad, se espera que las tecnologías logren ser eficientes y tengan un costo similar o inferior a las soluciones convencionales. Sin embargo, en la actualidad los costos son más altos y las compañías muchas veces no están dispuestas a asumir los riesgos que implica invertir en los proyectos para la transición, los que desde su punto de vista, en la actualidad tienen escasa variedad y fortaleza. Entonces, existe disposición por hacer la transición a través de proyectos más sustentables, pero no a costa de perder competitividad:

“Desde el punto de vista de costos, yo lo que creo es que primero la industria minera es una industria que lucha consigo misma, o sea con su esquema de costos para poder obviamente rentar por lo tanto, es extremadamente importante mantener esos costos a raya, por lo tanto, obviamente plantear una transformación sin tener una perspectiva sustentable del negocio al futuro no tiene mucho sentido”. (Compañía Minera)

“Nos están invitando a que no sea solo la mirada económica, pero si o si esta de la mano, o sea, si económicamente te hace aumentar mucho tus costos, resta para que tú tomes la batuta hoy en día y al final es donde nosotros tenemos que decidir: ¿queremos ser los primeros en adoptarlo, queremos estar en la media en adoptarlo o esperamos 2 o 3 años más? Porque ahí va a estar disponible de buena manera y decimos que ahí va a ser”. (Compañía Minera)

Específicamente, la reconversión de equipos se visualiza como una opción viable económicamente, pero sigue teniendo costos superiores que mantener las tecnologías convencionales. Los equipos eléctricos pueden tener un valor 20% o 30% superior con respecto a estas últimas, sin embargo este precio sigue siendo alto respecto a la disponibilidad económica a las cuales las compañías mineras se deben supeditar. Si bien la electrificación trae aparejada una reducción de costos a mediano plazo en costos de operación –sobre todo en minería subterránea-, implica un aumento de los costos de capital inicial:

“Donde el mayor aumento de capital por ejemplo de los equipos viene asociado al costo de las baterías, donde tienes que una pala o un camión normal vale 1 y un camión eléctrico con sus baterías vale 2, pero por lo tanto las compañías mineras tomamos la decisión y eso es lo que estamos ya planteando y haciendo con los primeros pilotos, de traspasar ese costo adicional a costo de operación, y básicamente se genera un battery services. Eso es solo un ejemplo de lo que te plantea un cambio de transición energética, que en el fondo tiene todo el sentido de la vida porque es como que tú y yo te dijera “cómprame hoy día tu auto a diésel y además cómprame un silo lleno de diésel, de todo el diésel que vas a ocupar durante el tiempo que lo

manejas”, también obviamente sería irracional hacerlo, y es como similar a lo que sería comprar una batería, porque finalmente el costo de la energía es realmente bajo, y hoy día nosotros estamos demostrando que hay un ahorro de energía de fácil un 70 %, y en unos poquitos años más va a ser un 90%.”(Compañía Minera)

En la medida que la tecnología va madurando, se espera que los precios vayan disminuyendo, ya que las compañías mineras reconocen que las soluciones eléctricas impactan positivamente en la salud ocupacional, la seguridad y el medioambiente, *drivers* que a mediano plazo podrían presentar grados de competitividad y habilitar casos de negocio. Esto no significa que estas tecnologías serán más baratas que las convencionales, pero si seguir siendo competitivas.

Si bien las compañías mineras reconocen que la transición energética es un desafío importante y que en este proceso el foco no debería estar supeditado a razones económicas, si este hace aumentar mucho los costos, se convierte en un obstáculo para que la minería decida adquirir nuevas soluciones, ya que implicaría ser más verdes a costa de una salida de mercado. Desde su punto de vista, si el *driver* sigue siendo la factibilidad económica, será difícil hacer la transición rápidamente, porque los objetivos de reducción de la huella de carbono deben estar por sobre el costo en las fases iniciales para que se haga viable:

“Por lo tanto, siempre que una empresa diga “okey quiero hacer esto” ¿Y cuanto cuesta? ¿Me cuesta más barato? Ya partiste mal, o sea, ya esa empresa no va a ser porque aunque tú lo convenzas de algo ya partiste por atrás. Entonces al final lo vay’ a forzar a que piense que incluso puede costar lo mismo, que ni si quiera... son objetivos que en realidad van más allá del costo y ahí es donde se hace viable. (Proveedor)”

Sin embargo, desde la visión de los proveedores las innovaciones tecnológicas serán llevadas a cabo en la medida que estas sean exigidas por la minería como estándar mínimo o bien, que las mineras estén dispuestas a pagarlo ya sea a un precio similar o superior. Según los datos de Cochilco⁷⁸, los factores asociados a los costos y al mercado son percibidos como las mayores barreras a la innovación desde el punto de vista de los proveedores:

⁷⁸ ídem

Gráfico 5. Barreras a la innovación según proveedores de la minería agrupadas por factor



Fuente: Cochilco 2020

En ese sentido, los contratistas no van a hacerse cargo de la inversión, porque suelen ser empresas más pequeñas y por lo tanto sus objetivos medioambientales no son tan exigentes. Desde su punto de vista, serían las compañías mineras grandes las que realmente se colocan objetivos definidos y por lo tanto el driver vendría desde su demanda para que la oferta se genere.

Sin embargo, desde la visión de las compañías mineras, serán los OEM o los proveedores quienes deberían asumir la responsabilidad de entregar estas nuevas soluciones. En ese sentido, observamos una barrera asociada a que ningún actor está dispuesto a realizar la totalidad de la inversión de los equipos.

En relación a ello, una forma de reducir las barreras económicas, es estableciendo los beneficios por reducción de huella de carbono, entendiendo que aquello podría aparecer como un incentivo para la transición energética. Para dar cuenta de este beneficio, estimamos la producción anual de CO₂ por equipo reconvertido, considerando parámetros de uso de combustible diesel y parámetros de eficiencia energética de equipos. Aquello permitió cuantificar el beneficio potencial de evitar compensar la huella de carbono considerando el valor de mercado de bonos de CO₂:

Tabla 21. Beneficio potencial de compensación de huella de carbono considerando bonos de CO2

Equipo	Demanda 2027	Rendimiento Combustible por hora	Consumo Diesel Anual Promedio	Huella CO2 (tons)
Rodillo	48	29,2	213160	946
Retroexcavadora	103	25,4	185420	2.008
Motoniveladoras	300	24,7	180310	9.968
BullDozer	481	14	102200	9.968
Excavadora	224	25,4	185420	4.384
Wheeldozer	185	113,6	829280	3.623
Perforadora superficie	81	132,4	966520	7.292
Cargador frontal (LHD)	91	46,3	337990	1.777

Fuente: Phibrand 2022.

Cabe destacar que el escenario base es el presentado en este documento y este es un escenario potencial asumiendo un 100% de adopción. En ese sentido, se entiende que actualmente la adopción es baja y está acotada a ciertas empresas. La tasa de adopción dependerá de situaciones reales. No obstante, observamos que la demanda por equipos aumenta en 12,7% por cada 10% de reducción del precio de la energía eléctrica, por lo que Asumiendo una tasa de adopción de 30%, una reducción de 10% de los precios de energía eléctrica generará un aumento en la demanda a 42,7%.

3.3 Barreras humanas

En términos culturales, algunas barreras refieren a los procesos de innovación que implica la transición energética, ya que si bien algunas de las tecnologías han sido utilizadas por multinacionales en otros países con resultados positivos, se percibe un alto costo de falla, que impulsa a priorizar las soluciones ya probadas a la experimentación:

“Porque la operación es como bien estable en los resultados que se comprometen con lo que tú tienes ya, los puedes lograr y mejorar un poco, pero esa parte de innovar y meterle como entropía un poquito al proceso, yo creo que la gente o los que están a cargo, les cuesta. No sé si será un tema generacional o va a algo más allá, no podría tener una respuesta clara en ese punto”. (Compañía Minera)

Además, los entrevistados manifiestan la necesidad de desarrollar una normativa y legislación en torno a los vehículos reconvertidos eléctricos, ya que actualmente existen dificultades para su operación vinculado a las debilidades de los marcos regulatorios que no se han adaptado al cambio tecnológico, aspecto habilitante para la transición y que se encuentra en desarrollo tanto a nivel industrial como a nivel minero. Respecto a los ámbitos en donde puede intervenir el sector público para apoyar la innovación en la minería, los proveedores consideran que el sector público debería favorecer la innovación a través de incentivos tributarios⁷⁹.

⁷⁹ Ídem

IV. Transición energética a largo plazo (2027)

La integración de energías renovables no convencionales (ERNC) en la industria minera nacional ha avanzado, proyectándose como una opción real de abastecimiento energético para los procesos involucrados en los proyectos mineros, tal como se mencionó en los capítulos precedentes. La evolución del precio de tecnologías de almacenamiento de energía solar, además de la competencia que se generaría entre productores de energía eléctrica dada su integración, hacen pensar que a largo plazo, el precio de la energía eléctrica podría disminuir, lo cual podría volver relevantes tecnologías en las que la energía eléctrica juegue un papel preponderante dentro de sus costos operacionales⁸⁰.

El transporte de material corresponde a un alto porcentaje del costo operacional en minería a cielo abierto, pudiendo llegar hasta un 50% del OPEX total debido al alto consumo de combustible diésel asociado al transporte tradicional por camiones⁸¹. Dado que el transporte de material está estrechamente relacionado con el costo mina, para las compañías mineras se vuelve de interés analizar sistemas alternativos, los cuales permitan reducir sus emisiones GEI, pero que a la vez puedan reducir costos y generen una mayor rentabilidad. En un horizonte temporal de largo plazo, se esperan alternativas en las que se utilice la energía eléctrica como un “sustituto del combustible diésel” en los camiones de alto tonelaje⁸². Por este motivo, es importante identificar tecnologías disponibles en el mercado que estén alineadas con la ruta de electromovilidad y tengan potencial técnico económico de emplearse en CAEX.

4.1 Camiones CAEX

Los camiones mineros de alto tonelaje (CAEX) son equipos diseñados para transportar el mineral desde la mina hasta su procesamiento y para acarrear cerca de 300 toneladas de mineral. Sus motores tienen una potencia cercana a los 2.000 kW, es decir, equivalente a un generador eléctrico. En términos de emisiones, el consumo de diésel de un camión CAEX es de 3.600 litros por día (un automóvil de ciudad recorrería 36.000 km con ese combustible). Cada camión emite anualmente 5.000 kilo toneladas de CO₂. Actualmente existen alrededor de 1.500 CAEX en Chile⁸³.

Con respecto a las proyecciones futuras en minas a cielo abierto, se esperan menores leyes del mineral extraído y mayor profundidad en las minas equivalentes a mayores distancias a recorrer⁸⁴. Dado lo anterior, es que estos equipos han aumentado su demanda de diésel

⁸⁰ Soto, M. (2019). Evaluación de Sistemas de transporte alternativos para Minería a cielo abierto. Memoria Para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170932>

⁸¹ ídem

⁸² ídem

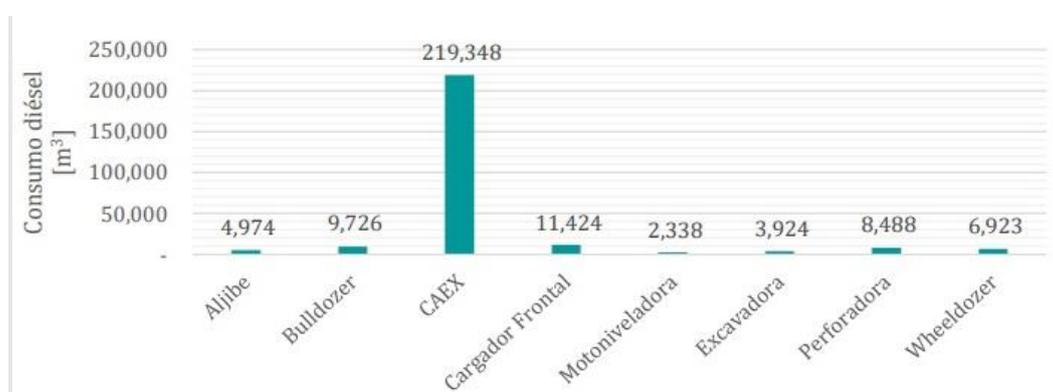
⁸³ Asociación Chilena de Hidrógeno (2021). Hidrógeno Verde en Minería.

⁸⁴ ídem

producto del incremento en las distancias que recorren para transportar el mineral desde su origen hasta su destino.

Los camiones mineros son los mayores consumidores de diésel en el sector minero. En una investigación realizada el año 2019⁸⁵, se analizaron las emisiones de carbono de la compañía minera Antofagasta Minerals. En el Gráfico 6, se observa la clasificación de los consumos más altos de combustible diésel por tipo de equipo. El gráfico muestra que el mayor consumo de combustible se concentra en la Mina, específicamente en camiones de extracción, equipos de carguío, perforadoras y algunos equipos de apoyo como wheeldozers, bulldozers y otros tipos de camiones menores.

Gráfico 6. Consumo de diésel por tipo de equipo en Antofagasta Minerals



Fuente: Avello (2021). Estudio técnico-económico de tecnologías que impulsan el desarrollo de la electromovilidad en minería.

Los CAEX representan el 67% del consumo total de diésel de Antofagasta Minerals, lo que hace atractivo evaluar tecnologías disponibles en el mercado que puedan ser aplicadas a camiones de extracción, ya que inclusive un pequeño cambio en la forma de propulsión podría generar un gran impacto en la reducción de consumo de combustible⁸⁶.

En este sentido, las compañías mineras visualizan el cambio de estos equipos como el mayor desafío para cumplir con los compromisos de reducción de emisiones a largo plazo. Este horizonte temporal se debe a que estos equipos implican mayores desafíos tecnológicos, por ejemplo el tamaño de las baterías y su peso, puede causar problemas pérdida en capacidad de transporte y aquello interfiere en los ciclos de trabajos, ya que aumentan los tiempos de carga. Además, existe una baja demanda global por camiones CAEX de 360 toneladas, lo cual no ayuda a incentivar y desarrollar estos equipos por parte de los fabricantes:

⁸⁵Avello, A. (2021). Estudio técnico-económico de tecnologías que impulsan el desarrollo de la electromovilidad en minería. Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Metalurgia y Materiales. Santiago-Chile. Obtenido de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50618/3560902038070UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁸⁶ Ídem

“Lo que pasa es que los CAEX son equipos que tienen una potencia de 3600 HP, tal vez un poco más que eso, por lo tanto es bastante más complejo, las soluciones para equipos más chicos es menos compleja” (Proveedor)

Actualmente, a propósito de la iniciativa *Greenhouse Gasses*, se están identificando distintos tipos de fuentes energéticas alternativas al petróleo que se puedan probar, analizándolas en forma desagregada y combinada y en algunas operaciones para conocer los perfiles de operación de los camiones y comenzar a hacer simulaciones respecto a consumo energético, potencia instalada, etc. de manera de poder llegar a hacer un buen análisis CAPEX-OPEX. Sin embargo, reconocen que la fase actual es una fase de investigación y análisis de los diferentes tipos de tecnologías verdes. Es un roadmap de largo plazo, es decir, de 5 a 10 años aproximadamente.

Las compañías mineras esperan desarrollar CAEX a nivel conjunto con proveedores, pero hoy día solo sería posible realizarlo con empresas extranjeras, ya que se escapa del desarrollo nacional. Proveedores nacionales permitirían a largo plazo electrificar estos equipos y lograr precios competitivos, ya que su experiencia es homologable a vehículos más grandes, pero aquello depende del tonelaje y actualmente no cuentan con esta tecnología. Tanto la fabricación como la reconversión serán procesos de implementación necesarios y que van de la mano con la regulación, el marco legal los incentivos del Estado en torno al proceso de transición energética:

“Entonces nuestros clientes han estado solicitándonos cómo vamos a ayudarles en la reducción de las emisiones mientras salen las nuevas tecnologías y a su vez cómo nos vamos a hacer parte de la economía circular una vez que lleguen estas nuevas tecnologías y qué vamos a hacer con los equipos que ya están en el mercado. Ahí es donde nosotros hemos estado más bien reflexionando cómo podemos impactar, porque desde la remanufactura obviamente que podemos hacer y contribuir algo a estas viejas tecnologías o a las vigentes, cómo hacerlas más amigables sin pensar en hacerlas carbono neutral porque ese es un esfuerzo muy grande llevarlos ahí desde la base instalada que tienen que es un motor diésel a combustión, ahí se abren otras alternativas que son cómo mejorar la eficiencia de los equipos primero”. (Proveedor)

Actualmente hacer un retrofeed es complejo y no existe claridad por parte de los desarrolladores sobre los costos que tendría la reconversión de estos equipos. En el caso de los camiones diésel mecánicos no existe la posibilidad de reconversión a eléctricos, por lo que los combustibles sintéticos vuelven a ser visualizados como un paso intermedio. En torno a ello, el Ministerio de Energía⁸⁷ prospecta que la entrada de los camiones eléctricos será gradual desde 2030, llegando los camiones cero emisiones a representar 40% de la flota a 2050.

⁸⁷Ministerio de Energía (2015). Desarrollo de Herramientas Prospectivas. Obtenido de

Como se mencionó en capítulos precedentes, por razones de disponibilidad tecnológica, muchas compañías mineras se han planteado ser tecnológicamente neutros. Las compañías mineras denominan su perspectiva o filosofía en torno a la transición a largo plazo como *power agnostic*, es decir, una apertura respecto a las fuentes energéticas con más potencial para alimentar a los camiones de alto tonelaje que puedan reemplazar al diésel: baterías, mezclas de baterías a controles, motores a hidrógeno:

“Estamos en una fase temprana donde tenemos que analizar cuál es el power pack correcto para nuestros camiones, no es tan directo porque podría condicionar tu diseño minero, podríamos condicionar tu productividad, o sea así de importante es la decisión, entonces no es trivial”
(Compañía Minera)

“En subterránea será 100% eléctrico a batería y ya hay proveedores, pero pocos. No es un mercado competitivo como tal, pero ya se puede empezar a probar. En el rajo hay electrificación a través de trolley, luego trolley más batería y al final recién aparece el hidrógeno como una posibilidad para ciertos rajos complejos de descarbonizar. Los camiones no están, no existen pero hay que desarrollarlos y ya existen alianzas de desarrollo. El hidrógeno no es un elemento de transición, es lo último que se va a dar en términos tecnológicos y económicos. Están más desarrolladas las baterías, pero puede que no sea suficiente para los rajos”. (Compañía Minera)

Relacionado con la perspectiva agnóstica respecto a las fuentes energéticas con mayor potencial, existe apertura respecto al mercado de la fabricación y reconversión de camiones. Se visualiza como horizonte de largo plazo, un mercado de fabricación y reconversión de CAEX a eléctricos, así como su reconversión a diésel-eléctricos o a diésel mixto. Sin embargo, actualmente los proveedores de camiones más relevantes siguen produciendo camiones con motores diésel:

“Podrían ser camiones trolley-baterías y sería 100% eléctrico, o 100% eléctrico a baterías, podría ser una mezcla. Los desarrolladores están trabajando con Komatsu, Caterpillar, para ver de qué manera abordarlo. Otra opción es hacer retrofeed de los equipos, porque hay equipos que aún tendrán vida útil y cuando te obliguen a hacer cero emisiones la única opción será hacer retrofeed.” (Compañía Minera)

La primera opción que se visualiza por parte de las compañías mineras y los proveedores es la tecnología trolley, luego el trolley a baterías –en donde se está evaluando que tipo de batería se utilizará- y después de eso el hidrógeno. Están en un proceso de desarrollo de tecnologías, ya que actualmente hay muchas tecnologías disponibles pero no para ser utilizadas en equipos grandes como los CAEX y no logran ser costo-efectivas comparadas con el diésel:

“Estamos recién en la etapa de encontrar el combustible y el diseño de los cambios a los sistemas a nivel de laboratorio, o sea estamos todavía ahí prototipeando, probando, pero a escala, entonces aún no tenemos visión de cómo vamos a llegar en términos de costo oportunidad [...] la verdad no lo sé, yo creo que va a llegar un momento en que la inversión inicial de transformar un equipo o de comprar un equipo con tecnología nueva siempre va a ser mayor a la actual, pero que su costo operacional si va a ser mucho más económico.” (Proveedor)

En síntesis, las compañías mineras requieren soluciones intermedias mientras salgan al mercado los equipos nuevos. En ese sentido, las tecnologías existentes deben ser rediseñadas y adaptadas para los equipos grandes. Para generar aprendizajes y desarrollos se releva la necesidad de contar con espacios de experimentación y pruebas a escala de lo que se está desarrollando en fabricación y remanufactura de componentes modificados para los equipos, para realizar mejoras a los motores eléctricos, intervenirlos y transformarlos en un motor mucho más eficiente:

“Nosotros tenemos una mina en Estados Unidos donde hacen pruebas y ahí podemos hacer más cosas, pero no está a escala productiva donde realmente se esfuerzan los equipos y se llevan a condición real como si fuese una mina aquí de cobre en el norte de Chile, entonces se necesitan espacios de experimentación, y también hay un desafío fuerte para nuestros clientes de cambiar la forma de planificar, la planificación minera donde ya los caminos pasan a ser un poco más rígidos y hay que pensar en cómo hacemos un sistema de trolley flexible, no creo que sea una locura, yo creo que algo así vamos a terminar viendo” (Proveedor).

Como se mencionó, una de las alternativas actuales para mejorar la eficiencia de los equipos es la tecnología Trolley. La tecnología Trolley Assist consiste en la instalación de un sistema eléctrico en el camión minero, el cual lo hace más eficiente en pendientes pronunciadas. Este sistema puede reducir entre un 70% y un 80% el consumo de combustible en el ciclo de transporte y permite disminuir la huella de carbono de una faena al basarse principalmente en el uso de la energía eléctrica⁸⁸. Los principales elementos que se deben considerar en la evaluación del sistema TrolleyAssist son la modificación de los camiones -permitiéndoles operar bajo este sistema-, el equipamiento del camión -con un pantógrafo y un sensor-, la existencia de subestaciones eléctricas y de un sistema de catenarias. Frente a un sistema de transporte tradicional, el sistema trolley entrega beneficios como⁸⁹:

⁸⁸Soto, M. (2019). Evaluación de Sistemas de transporte alternativos para Minería a cielo abierto. Memoria Para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170932>

⁸⁹ Ídem

1. Disminución del consumo de petróleo, conseguido al correr el motor en ralentí durante el tiempo en el que el sistema Trolley se encuentra activado. Dependiendo del largo de la rampa, la reducción del consumo de petróleo puede ser de hasta un 50%.
2. Incremento de la productividad por ciclo, alcanzada por la mayor potencia que pueden proveer los motores de rueda.
3. Aumento de la vida útil del motor diésel.

Para la implementación de este sistema deben tenerse ciertas consideraciones en las distintas dimensiones de un proyecto minero. Principalmente, se deben tener en cuenta los costos relativos de energía eléctrica y diésel, el costo de inversión de infraestructura, el costo de inversión para modificar el camión, el plan minero, los perfiles de transporte y la inversión adicional para equipos auxiliares.

Esta tecnología ha ido ganando fuerza como solución intermedia a mediano plazo ya que reduce el consumo de diésel. Sin embargo, tiene como complejidad incrementar la demanda de potencia eléctrica en las faenas, lo cual requiere un desarrollo de infraestructura en sitio para poder cubrir y administrar esa demanda. Esto implica inversiones importantes y por las características de la minería chilena no es tan competitivo por las condiciones geográficas de las operaciones, ya que tiene desarrollos concéntricos, mucha profundidad y cambios de infraestructura. Las compañías mineras que han adoptado los trolley han tenido que rediseñar sus rajes y hacer nuevas construcciones que permitan su operación:

En términos de inversión, podría haber intereses de los grandes proveedores de energía eléctrica en hacer toda esta infraestructura para conectar una demanda muy importante de todos estos equipos. Sería atractivo para una generadora tener una flota de camiones eléctricos, consumiendo su energía y cobrando esa tarifa eléctrica. Entonces, puede haber una inversión compartida entre los dueños, los operadores y los proveedores.

Se entiende que los trolley son un estadio intermedio para entender cómo implementar un sistema, desde la infraestructura, cómo hacer llegar la potencia, cómo es la operación, cuáles son las tasas de falla, etc.:

“Entonces yo creo que hay un intervalo de tiempo de aproximadamente entre 5 y 6 años de manera tal de que estas nuevas tecnologías estén. El trolley es una tecnología madura porque esto partió hace muchos años, lo que pasa es que no era económicamente factible en Chile, pero ahora sí lo puede ser. Y en definitiva van a haber varias transientes antes que exista madurez de las tecnologías y después teniendo esa madurez digamos no sé las empresas mineras podrán ir adaptando y adoptando estas nuevas tecnologías, pero es un proceso como mínimo yo me atrevería a decir entre 5 y 7 años, y probablemente después de eso cuando salgan nuevas otras alternativas probablemente una transiente de 10 años” (Proveedor)

4.2 Hidrógeno Verde

Aunque los camiones de alto tonelaje suelen ser impulsados por motores eléctricos, la electricidad es generada mediante la combustión de altas cantidades de diésel, por lo que se ha planteado es el uso del hidrógeno (H₂) como vector energético puede ser una alternativa concreta para avanzar en la carbono neutralidad⁹⁰. Además, dadas sus condiciones de uso en minería del cobre, algunas alternativas de bajas emisiones como Trolley o baterías son poco competitivas. Sin embargo, el hidrógeno parece una alternativa interesante para reducir las emisiones dado el menor peso y autonomía que entrega.

Para usar hidrógeno verde un camión CAEX requiere lo siguiente⁹¹:

- Demanda de H₂: 1 tonelada al día, cuando otros equipos como grúas horquillas y automóviles requieren menos de 5 kg H₂/día
- Capacidad de electrolizador requerida: 5 MW considerando operación de 10 horas al día, esto implica también disponer de la planta de generación eléctrica renovable asociada.
- Consumo de agua : Se considera usar agua desalada y/o recirculada de procesos, además el porcentaje respecto al total de agua de la industria minera es poco significativo (1,6% adicional de agua para reemplazar todo el diésel)

Si bien actualmente no hay soluciones de CAEX propulsados a hidrógeno disponibles, se encuentran en desarrollo dos líneas paralelas de tecnologías⁹²:

- Combustión dual: Alternativa de transición que consiste en operar el camión con un motor de combustión interna con una mezcla de diésel con hidrógeno, de esta manera se puede sustituir un porcentaje de diésel. La ventaja de esta solución es que entrega una confiabilidad igual al del camión actual pero adoptando el nuevo combustible sin reemplazar el motor sino que adaptándolo, preparando el camino a soluciones 100% hidrógeno.
- Celdas a combustible: Esta alternativa es modificar el sistema de propulsión del CAEX usando un paquete de baterías y celdas de combustible que permite que el vehículo se propulsione consumiendo 100% hidrógeno como combustible. Ésta sería la opción preferida tanto ambiental como económicamente a largo plazo.

⁹⁰Confederación de la Producción y del Comercio (CPC) & EY. (2020). Visión y Acción climática del mundo empresarial para Chile. Obtenido de https://www.ey.com/es_cl/comision-cop25/informe-cpc-ey

⁹¹Asociación Chilena de Hidrógeno (2021). Hidrógeno Verde en Minería.

⁹² Ídem

En 2019, se formó la Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile). Esta organización tiene por objetivo fomentar el uso de este vector energético, posicionándolo como agente facilitador de la transición energética y promoviendo su utilización en aplicaciones industriales, comerciales, residenciales y de movilidad. Esta se encuentra inscrita en el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, como Asociación Gremial y permite dar cuenta de la intención de avanzar en el posicionamiento de Chile como uno de los países líderes en la producción y exportación de Hidrógeno Verde, logrando de esta forma una mejora sustantiva en la economía, la sociedad y el medioambiente⁹³.

La Asociación Chilena de Hidrógeno identifica las principales ventajas del uso de hidrógeno verde en minería⁹⁴:

Consumo de hidrógeno		
Alto	Bajo	Depende de la aplicación
Principales ventajas		
Reducción de emisiones del principal componente (transporte minería rajo).	Reduce requerimientos en ventilación. Reducciones en emisiones	Algunos equipos fijos no son electrificables o se necesita respaldo ante falta de suministro eléctrico. Alternativas a procesos que consumen combustible fósil.
Estado tecnológico		
Dos alternativas en desarrollo (combustión dual y celdas de combustible).	En desarrollo	Existente para generación de respaldo. Líneas de proceso alternativas en desarrollo

Fuente: Asociación Chilena de Hidrógeno (2021b). Hidrógeno Verde en Minería.

Actualmente se está buscando incorporar el hidrógeno verde en equipos y procesos mineros, enfocándose en aquellos difíciles de electrificar como es el caso de camiones mineros de alto tonelaje, equipos móviles de minería subterránea y generación eléctrica de respaldo. Algunas de las aplicaciones que pueden ser integradas al sector minero son⁹⁵:

⁹³ Vásquez, R., Salinas, F. & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.

⁹⁴ Asociación Chilena de Hidrógeno (2021b). Hidrógeno Verde en Minería.

⁹⁵ Ídem

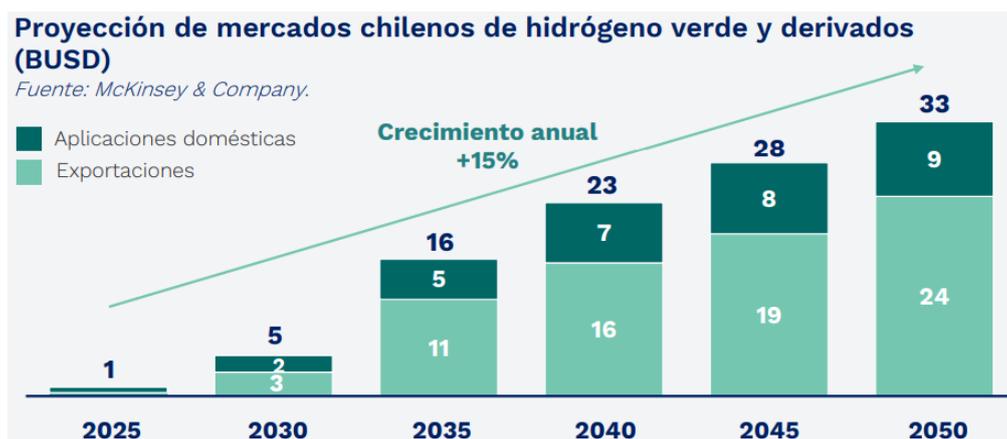
- Uso combinado del hidrógeno en motores de combustión dual (hidrógeno-Diesel), esto incluye desde vehículos livianos hasta camiones de alto tonelaje.
- Uso de celdas de combustibles en transporte de pasajeros desde y hacia las faenas mineras.
- Sistemas de respaldo energético para distintas áreas de la minera, especialmente para sistemas de comunicaciones y pozos de extracción de agua remotos, aislados de la red eléctrica.
- Reducción de emisiones contaminantes en gases de escape en hornos de refinería. El uso combinado de hidrógeno y nitrógeno, puede eliminar los humos negros a la salida de la chimenea y reducir los niveles de oxígeno y azufre.

La industria minera ya ha estado desarrollando estudios y contribuyendo a impulsar proyectos piloto de hidrógeno verde, iniciativas que han apuntado principalmente al transporte de carga en las faenas mineras, a las celdas de combustibles y a módulos de combustibles de las baterías.

La situación específica de Chile vinculada a la industria minera, abre oportunidades específicas para integración de tecnologías en el sector. Se estima que el hidrogeno verde tiene un valor entre 6 y 5 dólares por kilo⁹⁶. Sin embargo, un factor a considerar es que Chile actualmente mantiene el costo de producción más económico del mundo y se espera que para el 2030 el kilogramo de hidrogeno verde pueda alcanzar un valor 1,5 dólares/kilo⁹⁷. Asimismo, se espera que el mercado de hidrógeno verde pueda tener un crecimiento anual del 15% al de cara al 2025, lo que permite que este nicho sea una oportunidad real dentro del mercado chileno.

En la Figura 10, se observa la proyección del uso del hidrógeno verde en Chile:

Figura 10. Proyección mercado chileno hidrógeno verde y derivados



Fuente: Ministerio de Energía (2020).

⁹⁶Ministerio de Energía. (2020). Estrategia Nacional Hidrógeno Verde. Obtenido de: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

⁹⁷Revistaei. (2020). Hidrógeno verde: los mitos y verdades del combustible del futuro. Obtenido de: <https://www.revistaei.cl/2020/12/07/hidrogeno-verde-los-mitos-y-verdades-del-combustible-del-futuro/>

Desde las compañías mineras y los proveedores entrevistados existe una percepción respecto al uso del hidrógeno en minería, de que no existe suficiente conocimiento de la tecnología, su almacenamiento, su transporte y producción, además de la falta de estandarización de la infraestructura para su almacenamiento y distribución. En ese sentido, no hay información insuficiente o una escasa divulgación de la misma acerca de las características de las instalaciones, costos y desafíos desde la planificación a la operación, lo cual limita las posibilidades de demostrar los beneficios de la tecnología a un público amplio y aumentar el número de empresas interesadas en desarrollarla e implementarla⁹⁸.

“O sea, de verdad hoy día si tú me dices “yo te regalo el hidrogeno”, nosotros las empresas mineras no sabíamos a qué ponérselo, cómo ocuparlo honestamente, porque no hay aplicaciones significativas, se podría hacer el blending como una oportunidad quizás más temprana, pero más allá de eso igual va a requerir adaptaciones, más allá de eso no hay aplicaciones significativas donde uno diga “lo puedo ocupar acá”, porque no están los camiones, no están las pruebas, los desarrollos y los test que se necesitan para estos procesos de calor, etc. Entonces, creemos que ahí en la aplicación minera, en la tecnología, en el último eslabón de la cadena del hidrógeno podemos hacer una diferencia hoy en día, y por eso estamos como abogados principalmente a esos desarrollos”. (Compañía Minera)

Además, existe un desconocimiento de aspectos y requerimientos de seguridad, por ejemplo, del comportamiento del hidrógeno en ciertas condiciones geográficas, ventilación, comportamiento en áreas confinadas, etc.

Al mismo tiempo, si bien se encuentran en desarrollo, aún no se han establecido regulaciones y códigos de práctica. En febrero del año 2021 se promulgó la ley que define al hidrógeno como combustible en Chile y ya se encuentra en funcionamiento. Sin embargo, la minería es una industria que actualmente no tiene una regulación que aborde completamente el uso de hidrógeno como combustible⁹⁹. Actualmente se encuentra disponible la “Guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería”¹⁰⁰ elaborada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Sin embargo, dado que el uso del H₂ como combustible está actualmente en etapa de prueba, desarrollo y demostración del sistema piloto integrado, aún se encuentra en desarrollo la reglamentación específica que se exigirá para la realización de proyectos a escala real:

⁹⁸ Vázquez, R., Salinas, F. & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.

⁹⁹ Asociación Chilena de Hidrógeno (2021b). Hidrógeno Verde en Minería.

¹⁰⁰ Servicio Nacional de Geología y Minería (2021). Guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería.

“Hoy día no hay reglas claras de... ni si quiera de cómo operar con hidrógeno. Entiendo que de pilotajes tampoco. Temas de seguridad, normativos, temas de permisos. Y este potencial que ve Chile y en conversaciones anteriores con el ex ministro, obviamente que la minería juega un rol fundamental y si se alinean los incentivos para que todos los players de la industria minera en Chile y el gobierno puedan alinearse y generar polos de demanda –pero que también estén los incentivos en la oferta- y también incentivos económicos quizás y tener, digamos, las reglas claras, Chile podría tener un potencial gigante.” (Compañía Minera)

“Hay que generar las condiciones habilitantes para que todo este tipo de tecnologías vayan entrando, más allá de tener el equipo en la puerta de las garitas para que vaya a ingresar. Hay que tener gente capacitada, la normativa interna, las normativas nacionales, normativas desde el punto de vista de seguridad, de salud, las contingencias abordadas, que hoy –volviendo al tema de cultura organizacional- la minería ustedes la ven y es sumamente cerrada” (Compañía Minera)

En cuanto a aspectos técnicos, actualmente existen alternativas eléctricas para gran parte de la maquinaria en minería, excepto para la maquinaria pesada. Los camiones de hidrógeno habría que adaptarlos a las condiciones de la minería, lo cual requiere más investigación y expertos en esta tecnología. Además, habría que buscar soluciones para su transporte y almacenamiento, ya que el proceso actual tiene un alto consumo energético¹⁰¹. Por ello, una de las interrogantes refiere a la producción del hidrógeno en la actualidad, ya que no existe una oferta importante por parte de los proveedores, dado que la demanda de las compañías por estas soluciones sigue siendo potencial y las inversiones son grandes. En ese sentido, desde los entrevistados surge la interrogante acerca de las características de la oferta y demanda en el mercado del hidrógeno:

“¿Quién parte? ¿Parto yo colocándome con una estación, una hidrolinera? ¿Yo parto invirtiendo ahí o parto comprando el camión para que después se genere la hidrolinera? Está claro que lo primero es tener el suministro económico de hidrógeno [...] Si al final sé que hoy día si me coloco con una hidrolinera me va a salir producir hidrógeno 8-10 dólares por kilo y al valor que lo tení' que vender estoy muy lejos de competir con un diésel. Al final, el ser pro-sumidor parece que es la línea que en algunas empresas al menos uno ha escuchado: yo me produzco mi hidrógeno y yo consumo mi hidrógeno. Entonces ese concepto está presente hoy día porque tú no sabes si partes con la oferta o con la demanda a nivel país y no están los incentivos puestos

¹⁰¹Kracht, W. y Salinas, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Mineri%CC%81a-y-Cambio-Clima%CC%81tico-Si%CC%81ntesis-Ejecutiva.pdf>

hoy día... o no están claramente expuestos esos incentivos”. (Académico Universidad Técnica Federico Santa María)

En esa línea, en términos económicos el hidrógeno actualmente está lejos de ser competitivo, por lo que el impulso para su uso tendría que venir netamente de los compromisos de reducción de emisiones y objetivos medioambientales de las empresas. Actualmente, un camión a hidrógeno tiene un costo de alrededor de 6 veces lo que vale un camión diésel y 4 veces lo que vale un camión eléctrico. Además, existen costos asociados a infraestructura y equipamiento para producir hasta dispensar el hidrógeno. Para llegar a una economía de escala se requiere bajar un 40% o 50% el CAPEX actual. Esto hace que el hidrógeno sea visualizado en un horizonte temporal de largo plazo en el proceso de transición energética.

“Si creo –porque vemos que existen ya camiones a hidrógeno y buses a hidrógeno-, pero el costo de un bus a hidrógeno yo cuanto pregunté el año pasado, 1.000.000 de dólares y el bus diésel o el eléctrico cuesta el 20% o 30% de eso. Entonces hoy en día es inviable, a no ser que tú quieras hacer un compromiso de probar y ver cómo funciona la tecnología. Entonces, yo creo que el hidrógeno en la medida que aparezca la tecnología... en los CAEX se ve que a fin de la década, esa es la proyección”. (Proveedor)

En ese sentido, las principales barreras en la actualidad para el uso del hidrógeno en minería, están relacionadas con la factibilidad económica y con aspectos técnicos. Lo anterior guarda relación con los incentivos por parte del Estado para que se generen iniciativas concretas que disminuyan la percepción del riesgo en las inversiones. Los entrevistados perciben que muchas veces los desarrollos nacionales no han tenido éxito producto de la falta de colaboración entre la academia –que busca desarrollar investigaciones a largo plazo-, la industria –que requiere comprar tecnología ya probada- y el gobierno –que no ha dispuesto correctamente los incentivos que hagan conversar todos los actores-:

“Creo que el trabajo colaborativo o esta triología que funciona muy bien en otros países en Chile no se da. La industria es cortoplacista, la academia es de largo plazo y los incentivos para unir estos mundos por parte del gobierno parece que no han estado bien puestos. Creo que ahí está el principal problema”.(Académico Universidad Técnica Federico Santa María)

CONCLUSIONES

La transición energética que vive el país contempla la incorporación masiva de energías renovables, el retiro voluntario de centrales termoeléctricas a carbón, la eficiencia energética, la electromovilidad y la incorporación de hidrógeno verde y la gestión del litio, como piedras angulares. En este contexto, la reconversión de equipos y sistemas, desarrollo de eficiencia energética, presentan desafíos y oportunidades para empresas mineras, energéticas y proveedores para el desarrollo de este nuevo mercado.

Dentro de las medidas y estrategias de transición, las compañías mineras en la actualidad han estado enfocadas en la generación de contratos eléctricos de energías renovables y avanzado en la implementación de la electromovilidad en distintas categorías de equipos con el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad al 2050. En este contexto, la obtención de certificaciones relevantes como el sello Copper Mark -que acredita seguir las mejores prácticas de la industria otorgando credenciales de sustentabilidad a largo plazo-, también se traduce en oportunidades para el desarrollo y clasificación de proyectos que se pueden potenciar con la participación de proveedores.

En el presente estudio y en línea con el desarrollo de la electromovilidad, a corto y mediano plazo con miras al 2027, pudimos establecer la existencia de nichos de mercado y oportunidades de negocio en categorías de equipos mineros pequeños y medianos. Si bien estos equipos no son los más contaminantes del sector, consideramos su desarrollo como un avance hacia la descarbonización.

En primer lugar, en la fabricación y reconversión de vehículos destinados para el transporte de personal, identificamos oportunidades de negocio que en el caso de los buses reconvertidos es de 973,18 (MUS), mientras que el mercado de minibuses y taxibuses se espera que pueda alcanzar los 66,25 (MUS) y en el caso de las camionetas, se identificó una oportunidad de 405,68 (MUS).

Un segundo nicho identificado fue el de reconversión de equipos medianos de trabajo minero a eléctricos, específicamente equipos los de menos de 700 HP. En el caso de este nicho, los proveedores reconocen un cambio en las necesidades de la minería, hacia la electromovilidad y la automatización, por lo que ya existen empresas trabajando en esta dirección.

Sin embargo, observamos que muchos equipos no pueden ser electrificados dado que esta reconversión no es viable, específicamente los equipos medianos de trabajo minero con más de 700 HP. En este caso, visualizamos como oportunidad de negocio en un escenario de transición energética, su reconversión a combustibles sintéticos. Si bien este nicho se observa como temporal, permite avanzar hacia la reducción de emisiones y reducir la dependencia de combustibles fósiles, ya que los equipos de estas características emitirían alrededor de un 25%

de gases. En este contexto, a corto plazo también visualizamos oportunidades para el hidrógeno en la producción de combustibles sintéticos.

Los nichos identificados y las nuevas tecnologías incorporadas a los equipos permitieron establecer oportunidades de negocio en el mercado de mantenimiento de los mismos en base a las capacidades y costos de los mismos, lo cual si bien implica desafíos en términos de capacitación y profesionales, existen ya capacidades instaladas en los proveedores.

En base a las entrevistas realizadas, identificamos barreras que refieren a aspectos técnicos que presentaría la adopción de nuevas tecnologías. Entre ellas, la insuficiencia de instancias de pilotaje y validación de tecnologías, el bajo nivel de absorción tecnológica respecto a la transición energética y la necesidad capacitación y de nuevos perfiles profesionales. Por otro lado, obstáculos relacionados con la factibilidad económica que representa este proceso, un desfase entre las intenciones manifestadas por las compañías mineras en contribuir a una industria más limpia reduciendo sus emisiones y los recursos destinados a este propósito. Por último, visualizamos la existencia de barreras vinculadas a aspectos culturales propios de las organizaciones y del sector minero que limitarían la transición, específicamente, una baja disposición a la innovación por parte de las empresas.

Estas barreras en la transición energética, dan cuenta de la necesidad de desarrollar capacidades tecnológicas de análisis, medición y evaluación, que consideren las normas relevantes y la verificación de su cumplimiento, la interoperabilidad de sistemas mineros, eléctricos, electrónicos, químicos, mecatrónicos, gases, etc. En ese sentido, también abren oportunidades para proveedores de base tecnológica: laboratorios, instrumentación y personal para medición, evaluación y acreditación de emisiones.

Por otro lado, al situarnos en un horizonte temporal de largo plazo, consideramos que desde el 2035, comenzarán a existir avances más importantes hacia la descarbonización en minas abiertas, así como una reducción de combustibles fósiles importantes vinculado a la fabricación y reconversión de camiones CAEX, que son los equipos más contaminantes del sector. En este escenario, el hidrógeno verde como vector energético presentará oportunidades de mercado importantes, sin embargo las capacidades para su implementación están en desarrollo y el desafío en la actualidad, es desarrollar estrategias de transición energética con integración de esfuerzos público-privados que permitan desarrollar un roadmap, con líneas de financiamiento de largo plazo que atraigan inversiones para proyectos con costos nivelados competitivos.

En ese sentido, creemos las barreras identificadas pueden ser consideradas como desafíos y los nichos presentados pueden ser atractivos para desarrollar una oferta por parte de proveedores y empresas vinculadas al sector que puedan promoverlo. Para ello, es importante generar iniciativas concretas que disminuyan la percepción de riesgo que existe desde las compañías mineras y proveedores, disponiendo, por ejemplo, un programa de incentivos para el desarrollo de una transición energética en Chile, en que no solo participe el sector minero, sino otros sectores industriales (energía, transporte, etc.) en un marco de colaboración entre el sector público, privado y académico.

Anexo 1. Pauta de Entrevista Transición Energética Empresas Mineras

Nombre entrevistado:

Institución:

Cargo:

General:

1. ¿Cuáles son los principales desafíos en cuanto a consumo de energía en el corto y mediano plazo en su empresa minera/faena/proceso productivo?
2. ¿Existe una estrategia para la transición energética en su compañía minera?
 - a. ¿En qué consiste?
 - b. ¿Se está priorizando alguna tecnología o vector energético?
 - c. ¿Cómo se toman decisiones respecto a la estrategia? ¿Qué roles o cargos están involucrados?
3. ¿Cuáles serían los procesos que para la empresa minera haría sentido transitar hacia el uso de fuentes de energía no fósiles?
4. ¿Qué fuente o fuentes de energía cree que reemplaza a las fuentes fósiles en la minería?
5. ¿Existe algún plan para incorporar hidrogeno verde a sus procesos?
6. ¿Cuáles serían los procesos que para la empresa minera haría sentido transitar hacia el uso de hidrogeno verde?
7. ¿Qué probabilidades de implementación de hidrogeno verde en la minería percibe a corto y mediano plazo?
8. ¿Cuáles serían las barreras principales para que el hidrogeno verde sea utilizado en la minería chilena?
9. ¿Existen metas declaradas de reducción de emisiones, conforme a la ley de Eficiencia Energética?
 - a. Podría priorizar procesos o equipos que podrían considerarse
10. ¿Está al tanto de algún proyecto de transición energética en base al hidrogeno verde que pueda describir?
 - a. ¿A qué tipo de energía reemplazó?
 - b. ¿Cuáles han sido los problemas de implementación?
 - c. ¿Existe alguna ventaja o desventaja sustancial respecto al uso de hidrogeno verde versus la fuente tradicional de energía?
 - d. ¿Existe una valorización del impacto de la transición? (¿costo de implementación, nuevos equipos, ahorros potenciales, mejoras en la eficiencia?)
11. Casos de Negocios

- a. Identificación de problemas en proceso particular
- b. Identificación de brechas y objetivos de mejora/ideales
- c. Caracterización de soluciones actuales y sus limitantes
- d. Ideación de solución de transición energética
 - i. Cambio de fuentes de energía
 - ii. Cambio o transformación de equipos
 - iii. Costos implicados
- e. Potenciales mejoras
- f. Valorización de alternativa de hidrogeno verde vs solución actual.

Anexo 2. Pauta de Entrevista Transición Energética para Proveedores

Nombre entrevistado:

Institución:

Cargo:

General:

1. ¿Cuál es su visión general de los próximos 3 a 5 años de la implementación de energías renovables en determinados procesos mineros?
2. ¿Cómo se inserta su compañía en este escenario?
 - a. ¿Tienen nichos identificados?
3. ¿Existe una estrategia para la transición energética (energías fósiles a energías limpias) en su compañía?
 - a. ¿En su oferta existen actualmente productos o servicios en esta dirección?
 - b. ¿En qué consiste?
 - c. ¿Qué nichos son interesantes para explotar?
 - d. ¿Se está priorizando alguna tecnología o vector energético?
4. Respecto a la demanda, ¿Existe demanda de hidrogeno verde?
 - a. ¿Quiénes?
 - b. ¿Qué características tiene esta oferta?
 - c. ¿Qué ventajas podría ofrecer el hidrogeno verde respecto a la alternativa actual?
 - d. ¿Hay alguna industria donde se esté más avanzada la transición energética?
5. ¿Podría comentar acerca de proyectos con clientes de AL? ¿Qué se está haciendo?
6. ¿Cuáles serían las barreras principales para que el hidrogeno verde sea utilizado en la minería chilena?
 - a. ¿Es claro el valor que genera el hidrógeno verde?
 - b. ¿Qué dificultades involucra su implementación?
 - c. ¿Qué tiempos y otros recursos hay involucrados?
7. ¿Dónde se hace la investigación y las pruebas de aplicaciones nuevas del hidrogeno? (casa matriz versus mercado infraestructura local)
8. Otros
 - a. Preguntas sobre seguridad en el manejo del Hidrogeno Verde

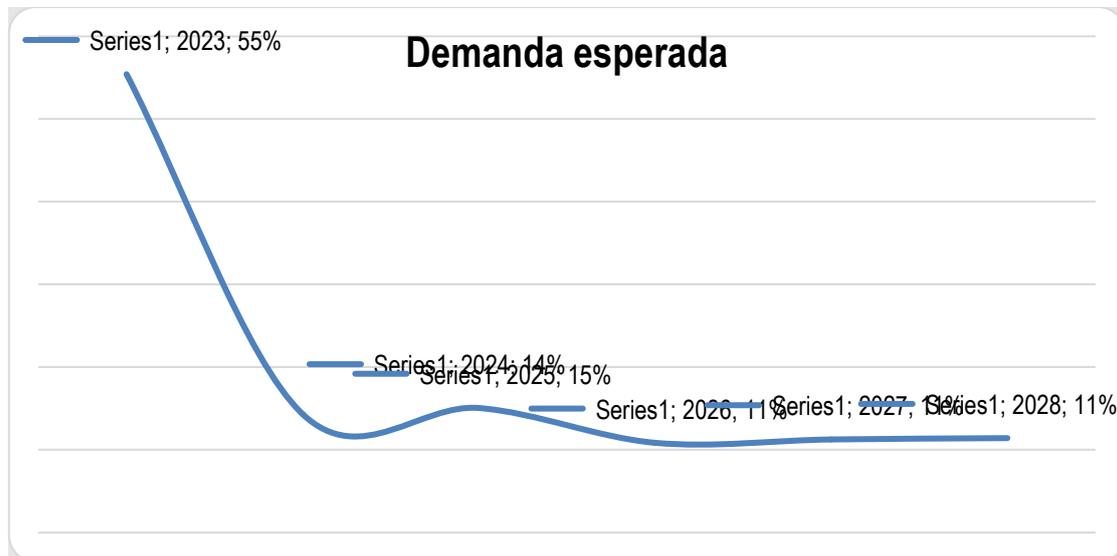
Anexo 3: Resumen uso de energías renovables en la minería chilena por contratos eléctricos

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 cilíndricos, para calentar 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 en una isla flotante sobre depósito de relaves que también reducen la evaporación del agua sobre el área que cubre.
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% de necesidades energéticas de Los Pelambres.
Los Pelambres, AMSA	Parque Eólico, El Arrayán	PPA	122 MV; 280 GWh/AÑO, 70% a Los Pelambres, -20% necesidades energéticas de Los Pelambres
Zaldivar, AMSA	Energías Renovables Colbún S.A	PPA 10 años	Contrato proveerá 550 GWh/año; 100% de energía limpia renovable reduciendo 350.000 t CO ₂ .
Centinela, AMSA	Energías Renovables Engie Energy	PPA	Contrato proveerá 186 MW a partir de 2022
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 Fotovoltaica Pozo Almonte 1,2,3	PPA 20 años	Contrato que provee desde el 2014 25 MW - 13% de necesidades energéticas de Collahuasi reduciendo 50.000 t CO ₂
	Energías Renovables Enel	PPA 10 años	Contrato proveerá a partir del 2020 1000 GWh/año 100% energías renovables, al - 80% necesidades energéticas de Collahuasi.
	Energías Renovables No Convencional Sonnedix	PPA	Contrato firmado en julio 2020 que proveerá a 150 GHw DE Energía Renovable no Convencional equivalentes al 12% de consumo energético de la compañía
Quebrada Blanca	Planta Fotovoltaica Andes Solar AES Gener	PPA 20 años	Contrato que provee desde el 2013 21 MW, - 30% de necesidades energéticas de Quebrada Blanca
Quebrada Blanca 2	Planta Fotovoltaica Andes Solar AES Gener	PPA	Contrato firmado en 2020 118 MV, -50% de necesidades energéticas de Quebrada Blanca 2
Carmen de Andacollo	Energías Renovables AES GENER	PPA 11 años	Contrato que proveerá entre 2020 al 2031 72MV lo que cubrirá el 100% de las necesidades de electricidad de la operación con energías renovables
Candelaria	Energías Renovables AES GENER	PPA	Contrato que proveerá a partir del 2023 1.100 GWh/año con energías renovables

		18 años	
BHP Escondida-Spence	Energías Renovables ENEL y Colbún	PPA	Contrato proveerá 6 TWh anuales, a partir de 2021 y segunda parte en 2022
		10 años ENEL	
		15 años Colbún	
Anglo American	Energías Renovables ENEL	PPA	Contrato que provee a partir del 2021 3TWh anuales
ENAMI	ACCIONA	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
	Energías Renovables y Plantas Fotovoltaicas		
CAP Group	Planta Fotovoltaica Amanecer Solar	PPA	Contrato que provee desde el 2014 100 MV; 250 Ha; -15% de necesidades energéticas de CAP
División Chuquicamata Codelco	Energías Renovables ENGIE	PPA	Contrato de 200 MW que proveerá a partir de 2021 comenzando con el 80% de las necesidades de electricidad de operación con energías renovables
		11 años	
Caserones	Energías Renovables ENEL	PPA	Contrato que proveerá a partir del 2021 el 100% de las necesidades eléctricas de la operación con energías renovables.
		17 años	
Sierra Gorda	Energías Renovables AES GENER	PPA	Contrato que proveerá a partir del 2023 el 100% de las necesidades de electricidad de las operaciones con energías renovables.
		18 años	
Manto Verde Extensión	Energías Renovables	PPA	Contrato que suministrará el 50% de las necesidades de operación con energías renovables
Cemin	Energías Renovables	PPA	Contrato que proveerá 1,48 GWh anuales para abastecer las instalaciones de las operaciones de Minera Pullalli, ubicada en La Ligua, Región de Valparaíso.
	ENGIE	4 años	
Lomas Bayas	Energías Renovables	PPA	Contrato que provee una potencia de 50 MW
	ENGIE	18 años	
El Abra	Energías Renovables	PPA	Contrato que provee una potencia total de 110 MW con un contrato base por 80 MW desde 2021 y un adicional de 30 MW hasta 2028.
	ENGIE	7 años	
Altonorte	Energías Renovables	PPA	Contrato que provee una potencia de 50 MW
	ENGIE		
Pampa Camarones	Energías Renovables	PPA	Contrato que provee 45 GWh/año hasta el 2040.
	ENGIE	20 años	

Fuente: Elaborado por Cochilco (2022) en base a información pública.

Anexo 4. Modelo de estimación: crecimiento de la minería del cobre, porcentaje inicial de reconversión y renovación de equipos anual.



Año	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Producción esperada (KTPD)	6143,4	6476,5	6755,7	7097,5	7157,9	7248
Crecimiento %		5%	4%	5%	1%	1%

Anexo 5. Cotizaciones compra de equipos.

 **Pedro Picero**
para mí ▾

Lo solicitado.

Retro 416:	US\$ 89.500
Excavadora 336 DL	US\$ 369.900
Bulldozer D6T	US\$ 320.900
Motoniveladora 140K	US\$ 250.818

Saludos!

Re: Cotizaciones Rodillo ▾ Recibidos x

 **R G J**
Hola Luis, así es, la enviare a la brevedad, Saludos

Departamento Maquinarias  Fono (2) 28  / 28  0 Anexo

mié., 12 dic. 15:18 

 **R**
para luis.almendra ▾  [\[Redacted\] a través de \[Redacted\] onmicrosoft.com](#)

 vie., 14 dic. 18:09 (hace 13 días)   

Estimado Luis, adjunto enviamos información técnica y catálogo de nuestra representada, WIRTGEN GROUP, su línea de rodillos compactadores autopropulsados, HAMM, Alemania.

Valor del equipo nuevo, Euro \$ 79.000 + Iva.-

Esperando que esta información sea de su interés, atento a cualquier consulta o comentario,

Gracias,
Saludos,

R
Departamento Maquinarias 
Fono (2) 28  / 28 
Celular +56 9  
[@ \[Redacted\] cl](#)
[www. \[Redacted\] cl](#)

RENTAL STORE CHILE

DIRECCIÓN:
Santiago Quilicura

WWW. .CL

Cotización N°: 20000812

12.12.2018

Fecha Validez: De:12.12.2018

Hasta:11.01.2019

Cliente
Atención
Dirección
Email

Tel 1:
Tel 2:

Of. de Venta : Santiago Rental

Vendedor
Tel. móvil:

Email:
Teléfono Fijo/Sucursal:

CANTIDAD DE EQUIPOS	MODELO	DESCRIPCION	CANON	TARIFA UNITARIA	HORAS EXTRAS	SUB TOTAL
1	D6T	D6T_6SU_SinIgeTilt_MultiShank_560mmES	Mensual(Rental) (180HORAS)	UF 343,80	UF 1,72	UF 309,42
1	140K	17-5 ton / Cabina AC ROPS FOPS / Potenci	Mensual(Rental) (180HORAS)	UF 313,20	UF 1,56	UF 281,88
1	336D2L	EXCAVADORA HIDRAULICA	Mensual(Rental) (180HORAS)	UF 406,80	UF 2,03	UF 366,12
1	416E	RETROEXCAVADORA	Mensual(Rental) (176HORAS)	UF 99,39	UF 0,54	UF 95,04

El Canon/es indicados no incluyen impuestos, transporte a cargo del cliente.

Comentarios:

CONDICIONES GENERALES

Equipos	Marca	Modelo	Tamaño	Precio (KUS\$)	Vida Util (hrs)
Transporte					
Komatsu 830E	Komatsu	830E DC-AC	220 t	4,589	120,000
Caterpillar 797F	Caterpillar	797F	363 t	6,866	120,000
Carguio					
Pala P&H 4100	P&H	4100	43m ³	25,440	150,000
Cargador Frontal L1800	LeTourneau	L1800	28 m ³	4,515	60,000
Perforación					
Perforadora de Producción	Sandvik	D90ESP	90.000 lbf	4,653	60,000
Perforadora de Control	Sandvik	D75KS	75.000 lbf	3,177	50,000
Equipos Auxiliares					
Bulldozer 580 HP	Caterpillar	CAT D10R	580 HP	1,792	50,000
Wheeldozer 856 HP	Komatsu	WD900	856 HP	1,725	50,000
Wheeldozer 527 HP	Komatsu	WD600	527 HP	2,145	50,000
Motoniveldora 297 HP	Caterpillar	16H/G	297 HP	1,135	50,000
Water Truck	Caterpillar	777D	20.000 gal	2,489	60,000

Anexo 6. Costo de mantención equipos.

CSA PARA 2.000 HORAS DE OPERACIÓN										
MÁQUINA	PREFIJO		KIT SOLO FILTRO		KIT REPUESTO + ACEITE		PLAN CONJUNTO		PLAN COMPLETO	
MIINCARGADOR 246D	5SZ/PAT/JAY/HMR	Ahora:	USD 868	Valor x Hora USD 0,4	USD 1,604	Valor x Hora USD 0,8	USD 2,540	Valor x Hora USD 1,2	USD 3,142	Valor x Hora USD 1,5
		Antes:	USD 1,446		USD 2,443		USD 3,529		USD 4,391	
RETROEXCAVADORA 416	CDB/MFG/EMS/HWB/LBF	Ahora:	USD 1,256	Valor x Hora USD 0,6	USD 2,071	Valor x Hora USD 1,0	USD 3,689	Valor x Hora USD 1,8	USD 4,639	Valor x Hora USD 2,3
		Antes:	USD 2,092		USD 3,310		USD 5,063		USD 6,251	
EXCAVADORA 320	A6F/A8F/BZF/FAL/KGF/MZD	Ahora:	USD 1,194	Valor x Hora USD 0,5	USD 2,503	Valor x Hora USD 1,2	USD 4,624	Valor x Hora USD 2,3	USD 6,130	Valor x Hora USD 3,0
		Antes:	USD 1,993		USD 3,938		USD 6,368		USD 8,252	
CARGADOR 950H	M1G / JLX	Ahora:	USD 1,960	Valor x Hora USD 0,98	USD 3,491	Valor x Hora USD 1,7	USD 5,766	Valor x Hora USD 2,9	USD 7,864	Valor x Hora USD 3,9
		Antes:	USD 3,266		USD 5,367		USD 7,642		USD 9,740	
TRACTOR D6T	SMC	Ahora:	USD 1,908	Valor x Hora USD 0,9	USD 3,968	Valor x Hora USD 1,9	USD 5,667	Valor x Hora USD 2,8	USD 7,031	Valor x Hora USD 3,5
		Antes:	USD 3,178		USD 5,901		USD 8,008		USD 9,954	
TRACTOR D8T	J8B/KPZ	Ahora:	USD 2,848	Valor x Hora USD 1,4	USD 5,165	Valor x Hora USD 2,5	USD 6,885	Valor x Hora USD 3,4	USD 8,385	Valor x Hora USD 4,1
		Antes:	USD 4,745		USD 7,786		USD 9,953		USD 12,093	
MOTONIVELADORA 140M	B9D/B9M/D9M	Ahora:	USD 2,250	Valor x Hora USD 1,1	USD 4,084	Valor x Hora USD 2,0	USD 5,985	Valor x Hora USD 2,9	USD 6,983	Valor x Hora USD 3,4
		Antes:	USD 3,748		USD 6,099		USD 8,408		USD 9,832	

*Los valores no incluyen IVA

*Los valores no incluyen la tarifa de viaje para los planes conjunto y completo.

CALCULO DE COSTO HORARIO DE UN TRACTOR ORUGA

DATOS GENERALES:

- Valor de adquisición (VA) = \$ 726,712.00
- Producto = tractor sobre orugas Caterpillar.
- Modelo = D7G CAT.
- Potencia = 200 HP.
- Vida económica útil (VEU) = (5 años = n), 2000 horas. Anuales 10,000 horas.
- Valor de rescate (VR) = 25% del valor de adquisición.
VR = \$ 181,678.