



Demanda de cobre a partir de la transición energética

DEPP 06/2022

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo proyecta la demanda de cobre al 2025, 2030 y 2040 a partir de cuatro sectores clave e interconectados de la transición energética: electromovilidad, energías bajas en emisiones, almacenamiento energético y redes eléctricas necesarias para sustentar el sistema. Para esto, ocupamos como fuente primaria las proyecciones del escenario STEPS de la IEA, el cual se basa en políticas establecidas y planes de implementación ajustados por las posibilidades reales de implementación.

Los resultados indican que la demanda de cobre incremental o neta respecto del escenario sin que existiera una transición crecería desde 1,2 Mt (millones de toneladas) en 2020 a 2,8 Mt en 2025, 3,5 Mt en 2030 y 5,4 Mt en 2040 (+8,0% CAGR respecto de 2020). Es decir, se multiplicaría por cinco veces al 2040. Visto de otro modo, la demanda de cobre a partir de la transición energética pasaría de representar un 5% de la producción total refinada en 2020 a un 10% en de la producción refinada esperada total al 2030, para luego triplicarse al 15% en 2040. De considerar el escenario potencial en que al 2040 el 100% de las ventas de automóviles sean eléctricos, sumaríamos 4,1 Mt adicionales, llegando a una demanda total neta de 9,6 Mt, lo que equivaldría al 27% de la producción esperada de cobre refinado a dicho año.

A nivel de los componentes de la demanda incremental, vemos que a mediados de la próxima década el total de vehículos eléctricos alcanzaría la mayoría absoluta en la participación en la demanda incremental, creciendo de 28% en 2020 a 53% en 2025 para luego mantenerse en torno a la mitad del total en 2030 y 2040. En el escenario potencial en que el 100% de las ventas correspondiesen a vehículos eléctricos manteniendo todos los otros segmentos de demanda iguales al 2040, se alcanzaría el 71%. En segundo lugar siguen las energías bajas en emisiones con 1,4 Mt al 2040 (27% del total), luego las redes eléctricas con 1,1 Mt, (20% del total) hacia 2040. Por último, la demanda derivada de adiciones de cargadores para vehículos eléctricos y adiciones de almacenamiento energético tendría participaciones minoritarias de 3% y 2% del total respectivamente hacia el 2040.

Ahora bien, existen riesgos relevantes a considerar. Si bien estos están presentes en todos los sectores, nos abocaremos exclusivamente en aquellos atingentes a los vehículos eléctricos, que representan el grueso de la demanda incremental: Primero, considerando que se trata de una industria inmadura, es probable que, conforme aumente la innovación, los oferentes optimicen su producción y atenúen su consumo unitario de cobre. Si bien en nuestro modelo asumimos reducciones en el consumo unitario, no es claro prever la magnitud de las mismas. Segundo, la robustez de las proyecciones descansa en gran parte en las expectativas de ventas de autos eléctricos. Si bien las proyecciones ocupadas son conservadoras en relación al mercado, puede haber desviaciones a partir de los precios relativos y cambios en el comportamiento poblacional, entre otros factores, que repercutan en menores ventas.

Con todo, a pesar de la incertidumbre, las expectativas del consumo de cobre a partir de la transición energética son altamente auspiciosas para la industria. Considerando que el éxito de Chile está inextricablemente asociado al desarrollo del cobre, esto presenta expectativas positivas para el desarrollo económico nacional en las siguientes décadas.

Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo	2
I. Introducción	4
II. Sectores considerados.....	5
1. Electromovilidad.....	5
a. Vehículos eléctricos.....	5
b. Cargadores.....	10
2. Energías bajas en emisiones.....	11
3. Transmisión Eléctrica.....	12
4. Almacenamiento energético	13
III. Metodología	14
1. Electromovilidad.....	14
a. Vehículos eléctricos.....	14
b. Cargadores.....	15
2. Energías bajas en emisiones.....	15
3. Red eléctrica.....	15
4. Almacenamiento energético	15
IV. Resultados	16
1. Electromovilidad.....	16
a. Vehículos eléctricos.....	16
b. Cargadores.....	18
2. Energías bajas en emisiones.....	18
3. Red Eléctrica.....	19
4. Almacenamiento energético	19
5. Total.....	19
a. Demanda total neta.....	19
b. Demanda total neta en relación a la oferta	20
V. Riesgos a la proyección	22
1. Riesgos al uso de cobre por unidad de vehículo eléctrico	22
a. Tecnologías de cátodo.....	22
b. Grosor de las láminas de cobre	23
c. Capacidad de las baterías de ion-litio	23
d. Menor uso de cobre en otros elementos de la arquitectura vehicular	24
e. Precio de largo plazo del cobre	24
2. Riesgos atingentes a las ventas totales de vehículos eléctricos.....	25
a. Precios y costos de los vehículos eléctricos en relación a los de combustión interna	25
b. Comportamiento de la gobiernos	26
c. Comportamiento de la población.....	28
VI. Comentarios finales.....	29
VII. Referencias	30

I. Introducción

Ante el interés científico y social por atenuar las emisiones de gases de efecto invernadero, la transición energética hacia una oferta y consumo energético bajo en emisiones se ha convertido en una meta para el desarrollo sostenible a nivel mundial (Naciones Unidas, 2022; Cohen, y otros, 2022). Esto atañe a una serie de componentes, destacando la descarbonización de la matriz energética a través de energías bajas en emisiones con especial hincapié en las fuentes renovables, la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos bajos en emisiones donde destacan los eléctricos, así como la instalación de sistemas de almacenamiento energético y nuevas redes eléctricas.

Se trata de objetivos entrelazados entre sí. En efecto, la flota de vehículos eléctricos naturalmente requiere de electricidad, la cual, en aras de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se busca que sea generada por fuentes bajas en emisiones, campo donde las energías renovables cumplen un rol central. En caso de que estas sean de índole intermitente, como la solar o la eólica, los sistemas de almacenamiento energético se vuelven relevantes. Finalmente, a fin de conectar la generación eléctrica a partir de energías bajas en emisiones con los sistemas de almacenamiento y los usos finales, las adiciones de redes eléctricas de transmisión y distribución se convierten en una pieza clave.

Un punto común a todos estos sectores es que suponen una demanda adicional de minerales, siendo uno de los principales el cobre. Al ser prácticamente el conductor eléctrico por antonomasia, se ha erigido como una pieza fundamental en una transición energética caracterizada por la electrificación. Ante esto, en los últimos años varios investigadores se han enfocado específicamente en la criticidad del cobre en los sectores involucrados en la transición. Trabajos en esta línea incluyen a Seck et al. (2020), Elshkaki, Graedel, Ciacci, & Reck (2016), Henckens & Worrell (2020), IEA (2021a) y Berahab (2022) entre otros.

Desde un punto de vista local, para un país como Chile donde el cobre es el principal recurso natural representando en torno al 11% del PIB y el 55% de las exportaciones durante la última década, la demanda a partir de la transición energética adquiere una relevancia alta. Por una parte, posiciona a Chile como un eslabón clave en la cadena de valor de la transición. Por otra parte, es posible que un rápido crecimiento de la demanda conduzca a alzas de precios, las cuales se traducirían en mayores rentas para la industria y el Estado. En este sentido, la transición energética no solo trae el beneficio global reducir las emisiones sino que indirectamente puede beneficiar económicamente a Chile de forma individual. En esta línea, el FMI (2022) proyecta que Chile sería uno de los países más beneficiados a partir de esta transición.

En este contexto, el presente trabajo busca proyectar al 2040 la demanda de cobre a partir de todos los sectores mencionados de la transición energética con especial profundización en electromovilidad. Para esto ocupamos como base las proyecciones de ventas de autos eléctricos y uso de cobre en energías bajas en emisiones del escenario STEPS de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el cual refleja una base relativamente conservadora de expectativas en base a las políticas y marcos regulatorios actualmente existentes. Secundariamente, empleamos proyecciones de otras agencias que regularmente analizan mercados particulares atinentes al interés del presente estudio.

El trabajo a continuación se divide en cuatro partes: En la sección II describiremos los sectores considerados y sus proyecciones de crecimiento. En la sección III se presenta la metodología de proyección de uso de cobre en base a la cual, en la sección IV, se estiman los resultados. Luego, en la sección V se exponen los mayores riesgos de la proyección particularmente para el sector de electromovilidad. Finalmente, en la sección VI se hace una breve discusión.

II. Sectores considerados

El presente estudio se aboca en cuatro sectores intensivos en cobre y complementarios entre sí: electromovilidad (considerado vehículos eléctricos y cargadores), generación eléctrica a través de energías bajas en emisiones (en gran parte energías renovables), infraestructura de redes eléctricas y sistemas de almacenamiento energético.

Las estimaciones de adiciones de venta y capacidad de cada sector se construyeron fundamentalmente en base al escenario STEPS (*Stated Policies Scenario*) de la IEA, el cual refleja las expectativas en base a las políticas y marcos regulatorios existentes. Para esto se consideran las ambiciones y objetivos a nivel gubernamental así como las dinámicas de mercado en base a datos históricos y *drivers* socioeconómicos. Cabe señalar que este escenario supone una acción insuficiente para una transición energética acelerada (IEA, 2021). Ante esto, actúa como una base relativamente conservadora para nuestras proyecciones.

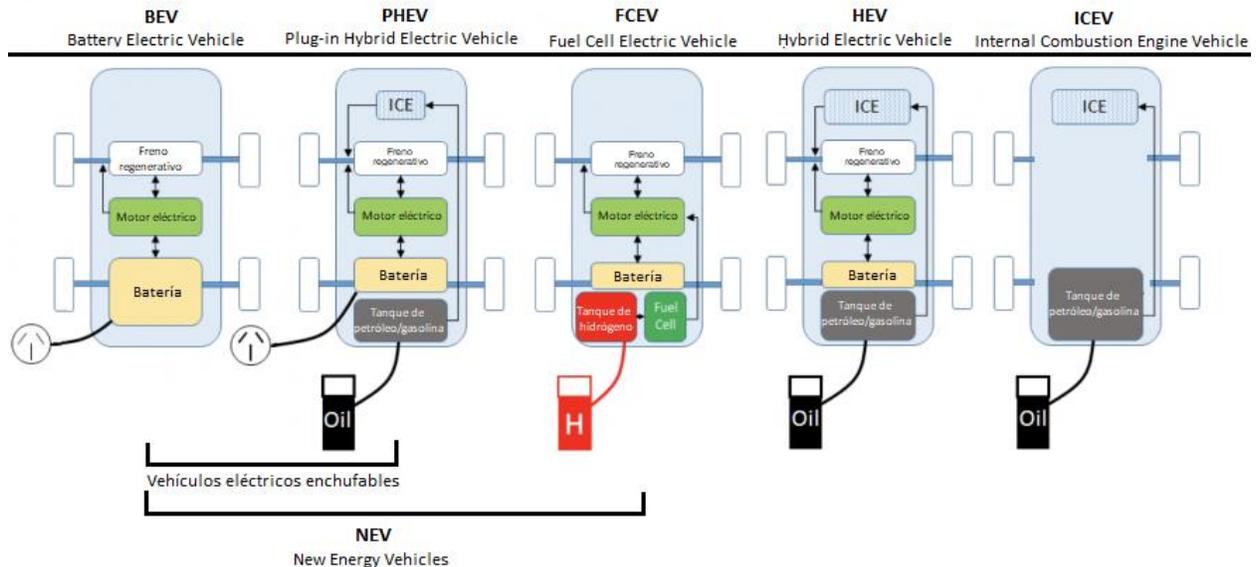
1. Electromovilidad

Al hablar de demanda de cobre a partir de electromovilidad se pueden distinguir dos fuentes: (a) el cobre directamente usado en la fabricación de los vehículos eléctricos, y (b) el cobre en cargadores. También se pueden distinguir otras dos fuentes de apoyo: el cobre en posibles adiciones de redes y de generación eléctrica. Estas se discutirán separadamente en las secciones siguientes.

a. Vehículos eléctricos

A fin de comprender en mayor detalle este auge, los gobiernos de distintos países y la industria en general emplean una serie de acrónimos y clasificaciones para distintos tipos de automóviles. En la **Figura 1** a continuación describiremos brevemente las principales categorías para efectos del presente estudio.

Figura 1: Categorías de automóviles



Fuente: Cochilco en base a Gatton (2018).

- BEV (*Battery Electric Vehicles*): Funcionan exclusivamente a base a baterías recargables con energía eléctrica. Por ende, son vehículos puramente eléctricos.
- PHEV (*Plug-In Hybrid Electric Vehicles*): Cuentan con un motor eléctrico y de combustión interna. Típicamente solo emplean el motor de combustión interna cuando la batería está descargada.
- FCEV (*Fuel-Cell Electric Vehicles*): Usa una batería para cargar su motor eléctrico. Típicamente generan electricidad con oxígeno e hidrógeno.
- HEV (*Hybrid Electric Vehicles*): Operan con un motor tradicional de combustión interna y una batería que provee energía vía freno regenerativo o mientras se emplea el motor. Sin embargo, a diferencia de un PHEV, no cuentan con un puerto de carga eléctrica.
- ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicles*): Operan con un motor de combustión interna en base a gasolina o petróleo.

Los BEV, FCEV y PHEV se clasifican en jurisdicciones como California y Canadá como Vehículos sin Emisiones o *Zero Emission Vehicles, ZEV* (Kurani, Caperello, & TyreeHageman, 2016) en tanto no generan emisiones de gases de efecto invernadero de forma directa¹ mientras operen en modo eléctrico. La IEA (2022a) clasifica como autos eléctricos solo a los enchufables (BEV y PHEV). En China se clasifican como Vehículos de Nuevas Energías, o *New Energy Vehicles, NEV* (Gong, Wang, & Wang, 2013). En adelante emplearemos esta última definición o bien, por simplicidad dada su aceptación popular, vehículos eléctricos.

Por otra parte, los vehículos también se pueden clasificar según su medio de transporte. Aquí distinguimos vehículos livianos de pasajeros como automóviles de cuatro puertas (en adelante, autos) y vans, vehículos pesados como buses y camiones, vehículos de dos y tres ruedas incluyendo distintos tipos de motocicletas, ciclomotores y *scooters*. Por último, consideraremos las bicicletas eléctricas.

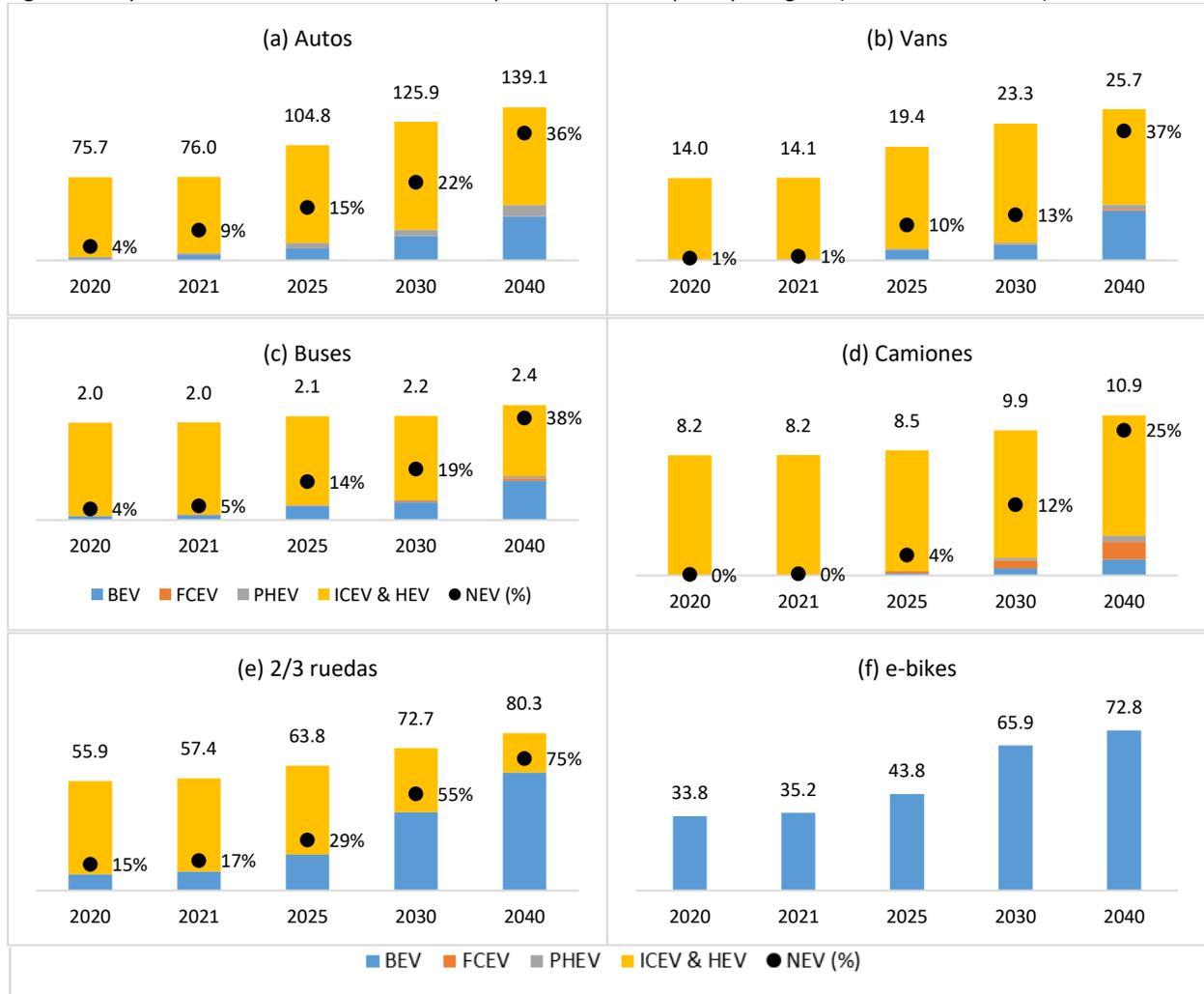
A partir del escenario STEPS de la IEA (2022b) para BEV y PHEV e IEA (2021d) para FCEV obtenemos las ventas NEV nuevos (automóviles livianos pequeños, vans, buses, camiones) en los años 2025, 2030 y 2040². Las proyecciones de ventas de los ICEV y HEV se construyeron en función de los porcentajes estimados de penetración de BEV y PHEV en el total de ventas. Por último, para el caso de otros medios de transporte como vehículos de dos y tres ruedas, ocupamos proyecciones generales explicitadas en IEA (2022a), mientras que para las bicicletas eléctricas empleamos estimaciones de ventas y tamaño de mercado de Precedence Research (2022) y Deloitte (2020).

La **Figura 2** a continuación ilustra las proyecciones de ventas de vehículos nuevos según su medio, sean (a) automóviles livianos de pasajeros de cuatro ruedas (en adelante autos por simplicidad), (b) vans, (c) buses, (d) camiones, (e) vehículos de dos o tres ruedas y (f) bicicletas; y categoría, sean BEV, FCEV, PHEV, ICEV & HEV.

¹ Sí existe una discusión respecto de su contaminación a partir del grado de carbonización de la matriz eléctrica usada para proveer la energía vehicular de los BEV y PHEV así como de las emisiones producidas a partir de la fabricación de los automóviles.

² Las proyecciones al 2040 son extrapoladas a partir de datos generales expuestos en IEA 2021.

Figura 2: Proyección de ventas de vehículos nuevos por medio de transporte y categoría (millones de unidades)



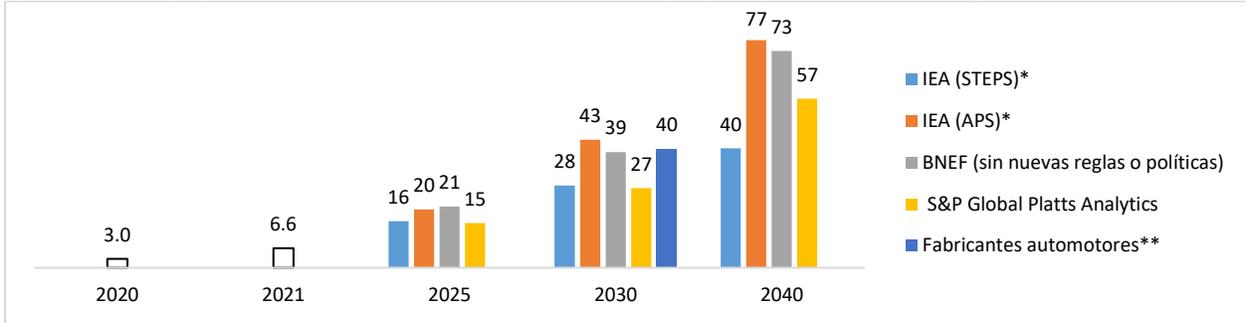
Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de la IEA (2022b; 2021d), Deloitte (2020) y Precedence Research (2022).

Del gráfico (a) de la Figura 2 se observa que las ventas de vehículos livianos de pasajeros de cuatro ruedas en la primera figura son con cierta distancia la mayor fuente de demanda total proyectada en el sector. En efecto, se espera que en este medio de transporte las ventas de NEV crezcan del 9% de las ventas totales al 2021 al 22% al 2030 y al 36% al 2040³.

Como se observa en la **Figura 3** a continuación, en general estas proyecciones en base al escenario STEPS son conservadoras en relación al escenario APS (*Announced Pledges Scenario*) de la IEA, el cual asume que todas los planes declarados se cumplen a cabalidad (sin ajustes a la baja, como se hace en STEPS). También resultan relativamente moderadas en relación a proyecciones de BloombergNEF (asumiendo que no hay nuevas regulaciones ni reglas) y S&P Global Platts, quienes proyectan ventas en general mayores que las del escenario STEPS. Por último, cabe mencionar que hacia el 2030 los propios fabricantes apuntan a conseguir ventas de al menos 40 millones de unidades (considerando BEV, PHEV, FCEV).

³ Cabe señalar que este medio de transporte ha tenido un crecimiento prácticamente exponencial, incrementando sus ventas desde 120 mil en 2012 a 6,6 millones en 2021. Es decir, en menos de una década las ventas semanales superan a las anuales.

Figura 3: Ventas proyectadas de autos eléctricos nuevos livianos de pasajeros (millones de unidades)



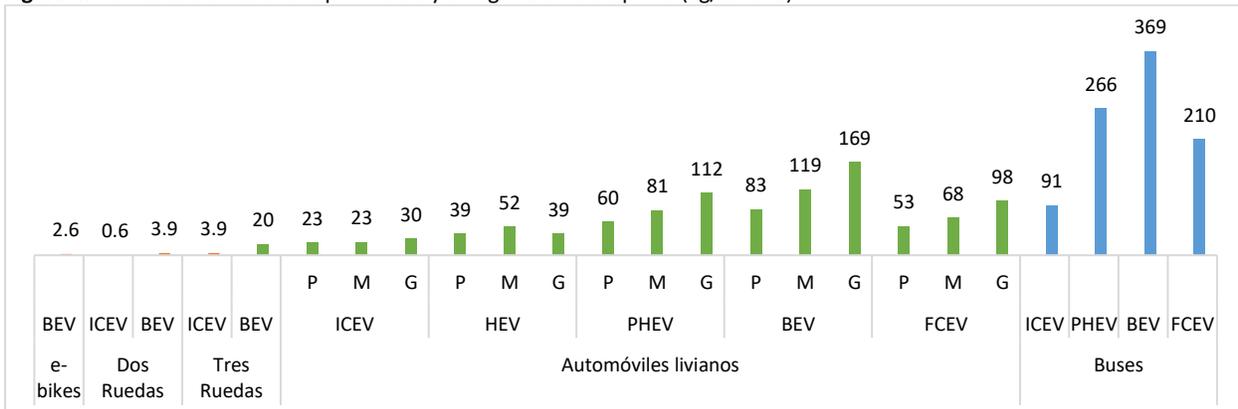
*Proyecciones al 2040 estimadas por Cochilco en base a cada escenario. **Metas de algunos fabricantes incluyen FCEV. Fuente: Cochilco en base a BNEF (2021d; 2022), IEA (2022b) y S&P Global (2022).

Consumo unitario de cobre por categoría

La Figura 4 a continuación presenta el uso estimado de cobre por unidad según medio, categoría y tamaño del vehículo. Se observa que en promedio un BEV liviano emplea prácticamente cuatro veces más cobre que un ICEV, ratio que disminuye al triple para un PHEV y a un poco más del doble para un FCEV. En el caso de los buses eléctricos, las proporciones se mantienen relativamente similares, no obstante lo cual el consumo de cobre en relación a un auto es sustantivamente superior.

En términos generales, estos valores están alineados con otras fuentes. La Copper Development Association (CDA, 2017) y la International Copper Association (ICA, 2017) emplean las estimaciones de IDTechEx de 83 kg y 60 kg para BEV y PHEV respectivamente, lo que alinea con la estimación para un BEV de pasajeros pequeño expuesta en la Figura 4. Estas cifras parecen haberse mantenido en el mercado en tanto siguen siendo ocupadas en estudios de agencias de mercado y financieras como DBS Asian Insights (2018), Citi Research (2021) y Goldman Sachs Research (2021) y Wood Mackenzie (2022). Ahora bien, en la práctica existe una alta sensibilidad dada por el tamaño del vehículo y, también, al avance tecnológico.

Figura 4: Uso estimado de cobre por medio y categoría de transporte (kg/unidad)

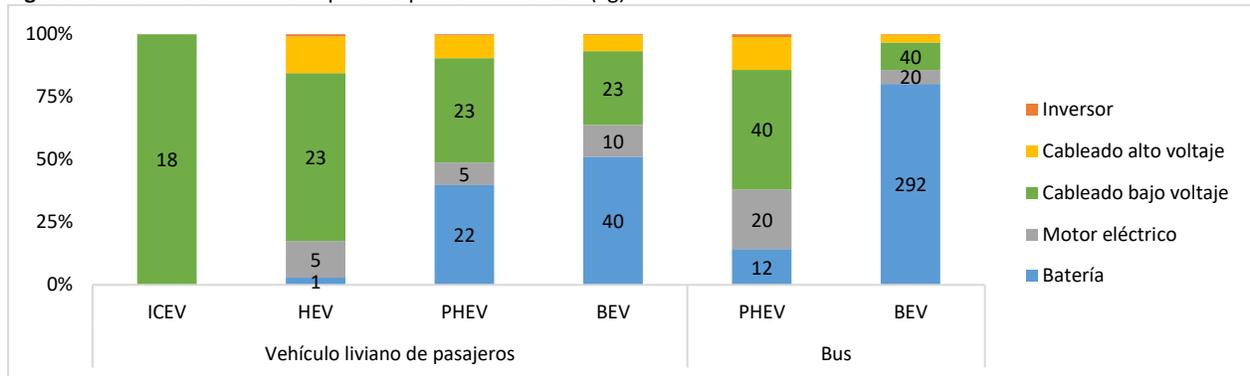


P: Pequeño, M: Medio, G: Grande.

Fuente: Cochilco en base a Seck et al. (2020), Deloitte (2020), DBS Asian Insights (2018); Cherry et al. (2009) para e-bikes.

En complemento a lo anterior, la **Figura 5** presenta el uso estimado por de cobre por componente vehicular. Vemos que en los vehículos eléctricos el cobre se emplea mayoritariamente en las baterías, concentrando cerca de la mitad del total para el caso de los BEV y un tercio en los PHEV. En efecto, el contenido de cobre en la batería del vehículo representa en torno al 50% del cobre total en un vehículo eléctrico liviano de pasajeros (40 kg de 83 kg) y alrededor del 80% en un bus eléctrico (292 kg de 362 kg).

Figura 5: Uso estimado de cobre por componente vehicular (kg)



Fuente: Cochilco en base a Seck et al. (2020), Deloitte (2020) y DBS Asian Insights (2018).

En las baterías el cobre se emplea fundamentalmente al nivel de la celda bajo la forma de láminas de cobre electro-depositadas (*electro-deposited copper foil*), que actúan como colectores de corriente del ánodo (Jiao, 2019; Wood Mackenzie, 2022). La cantidad de cobre requerido suele medirse por cada kWh de capacidad, ratio que varía según composición química del cátodo considerado. A partir de estimaciones expuestas en la literatura, Månberger & Stenqvist (2018) computan un rango amplio de 0,145–1,37 kg de cobre por kWh según el cátodo considerado, ocupando 0,4 kg/kWh como nivel aceptable para su modelo. Con esto, una batería de 75 kWh de capacidad requeriría unos 30 kg de cobre al nivel de la celda⁴.

Goldman Sachs Research (2021) estima rangos entre 0,5 kg/kWh para baterías del tipo NCA a 0,7 kg/kWh para las NMC811⁵. Macquarie Research (2019) por su parte estima una densidad promedio de 0,6 kg/kWh en baterías pequeñas y 0,75 kg/kWh en las grandes, proyectando que estos ratios caigan a 0,5 kg/kWh y 0,55 kg/kWh respectivamente hacia el 2025. No obstante, acota que incluso estas reducciones pueden resultar conservadoras a la luz de los avances tecnológicos y que las baterías de mayor densidad energética en general tienen un menor requerimiento de cobre.

Como vemos, existe una alta variabilidad en el consumo según el tipo de batería. Si bien en principio se puede proyectar la demanda de cobre en celdas de baterías de vehículos eléctricos a partir de los usos estimados por tipo de batería y capacidad en el tiempo, por simplicidad nos guiaremos de los usos estimados de cobre presentados en la Figura 4 para la totalidad del vehículo, ahondaremos más sobre este tema en el capítulo IV sobre riesgos a nuestra proyección de demanda.

⁴ A lo anterior hay que agregar los conectores eléctricos dentro de la batería, cuyo contenido de cobre típicamente varía entre 3 kg y 6 kg por batería para vehículos livianos de pasajeros (Jiao, 2019).

⁵ Un cátodo del tipo NCA hace referencia a la composición de sus materiales: Níquel, Cobalto y Aluminio mientras que NMC se compone de níquel, manganeso y cobalto. Las proporciones varían según cátodo. Por ejemplo, cátodos NMC111 (compuesto en partes iguales por níquel, manganeso y cobalto) o NMC622 (6 partes de níquel por cada dos partes de manganeso y cobalto).

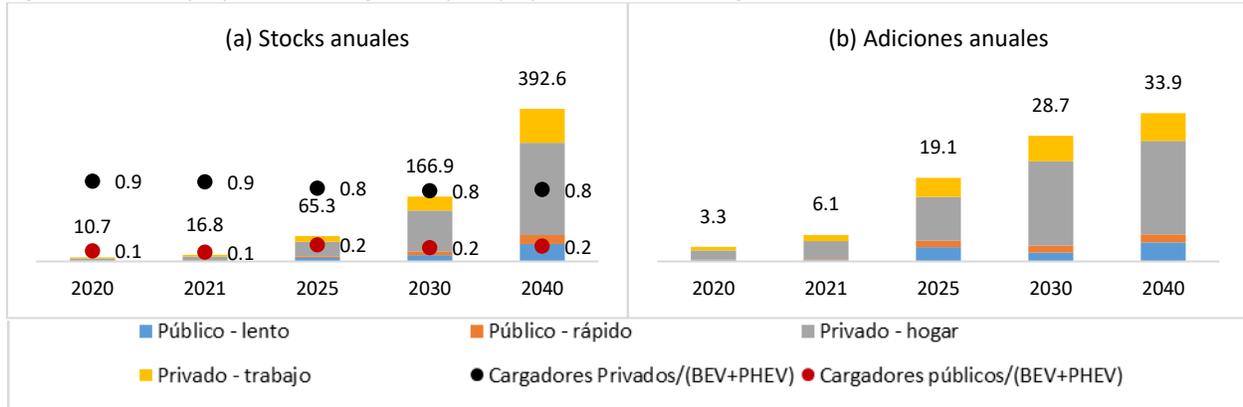
b. Cargadores

El desarrollo de la electromovilidad naturalmente requiere de electricidad, ante lo cual se requieren cargadores. Sobre este punto si bien existe discusión a nivel académico, político e industrial sobre si la construcción de estas estaciones y cargadores así como su integración al sistema eléctrico debe preceder a las ventas de autos eléctricos, lo cierto es que es que esta infraestructura deberá ser construida.

Si bien la IEA no provee proyecciones de cargadores al 2040, podemos estimarlos a partir del ratio entre el stock proyectado de cargadores públicos y el stock proyectado de vehículos eléctricos al 2025 y 2030 en el escenario STEPS⁶. Para estimar su denominador al 2040, es decir, el stock de vehículos eléctricos, ocuparemos el stock proyectado al 2030 y sumaremos las ventas anuales suponiendo una vida útil de 15 años para aquellos ya en stock, y una pérdida de 2% anual a causa de desuso, accidentes u otro motivo.

A partir de estos supuestos podemos construir el gráfico (a) de la Figura 6, que ilustra el stock proyectado de cargadores en los años considerados. Igualmente, el gráfico (b) muestra las adiciones anuales requeridas, construido en base a la diferencia del stock interanual para cada tipo de cargador considerado. Vemos que la mayor parte de los cargadores son privados de uso residencial (65-69% del total dependiendo del año considerado). No obstante, la capacidad de carga y su uso promedio de cobre no son equivalentes entre cada categoría, como veremos a continuación.

Figura 6: (a) Stock proyectado de cargadores por tipo y (b) adiciones de cargadores (en millones de unidades)



Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de la IEA (2022b).

Consumo unitario de cobre por estación de carga

El consumo de cobre varía sustancialmente según tipo de cargador considerado. Mientras que los cargadores residenciales emplean en promedio unos 2 kg de cobre, los ultra-rápidos DCFC (*Direct Current Fast Chargers*) típicamente instalados adyacentemente a carreteras pueden llegar a usar más de 10 veces esa cantidad. La Tabla 1 a continuación ilustra a los cargadores considerados según su rango energético, sus emplazamientos generales y su consumo de cobre estimado.

⁶ En general el ratio de cargadores privados por auto eléctrico liviano fluctúa entre 0,8 y 0,9 mientras que para los cargadores públicos entre 0,1 y 0,2. Es de esperar que a medida que se incremente la adopción de autos eléctricos, aumente la infraestructura de carga pública. Con esto, el ratio de cargadores públicos se incrementará como respuesta a mayores ventas (IEA, 2022).

Tabla 1: Contenido de cobre por tipo de cargador (kg/unidad)

Tipo	Rango energético (kW)	Ubicaciones generales	Consumo de cobre		
			Cargador	Cable	Total
Hogar (Nivel 1)	1,3-2,4 kW	Hogares	1	1	2
Público (Nivel 2)	3-19 kW	Estacionamientos corporativos y públicos, tiendas comerciales, malls, hoteles, algunos hogares	4	3	7
Público (DCFC)	50-350 kW	Adyacentes a carreteras	10	15	25

Fuente: Cochilco en base a ING (2021), IEA (2022a) y Freewire (2020).

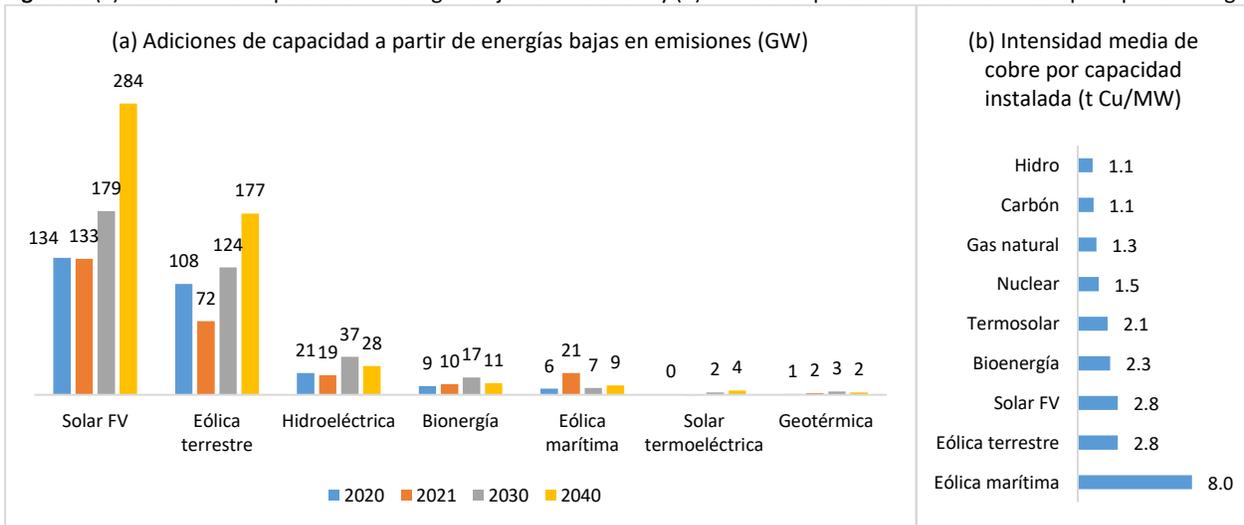
2. Energías bajas en emisiones

A fin de que la electromovilidad tenga un sello verde, debe estar asociado a una generación eléctrica baja en emisiones de gases de efecto invernadero en desmedro del carbón y otros combustibles fósiles. De otro modo, con la transición de vehículos convencionales a eléctricos se trasladaría el punto de generación de emisiones desde el vehículo a la planta generadora de energía. En este contexto, las energías bajas en emisiones se han convertido en una herramienta central para descarbonizar la matriz energética.

Para efectos del presente trabajo, consideraremos específicamente a la solar (fotovoltaica y de concentración termoeléctrica), eólica (terrestre y marítima), hidroeléctrica, geotérmica, bioenergía y la nuclear. Se trata, con la excepción de las dos últimas mencionadas, de fuentes renovables.

Como se observa en el gráfico (a) de la Figura 7, durante 2020 la energía solar fotovoltaica junto con la energía eólica terrestre concentraron el 87% de las adiciones de capacidad instalada dentro del total de energías bajas en emisiones. Es de esperar que en el mediano plazo continúen creciendo y manteniendo una alta participación dentro del segmento. En paralelo, del gráfico (b) de la misma figura vemos que la intensidad promedio de uso de cobre por capacidad instalada varía significativamente según la fuente energética considerada, fluctuando entre 1,1 toneladas de cobre por MW en el caso de un combustible fósil como el carbón y 8 t/MW en el caso la energía eólica marítima.

Figura 7: (a) Adiciones de capacidad vía energías bajas en emisiones y (b) intensidad promedio de uso de cobre por tipo de energía



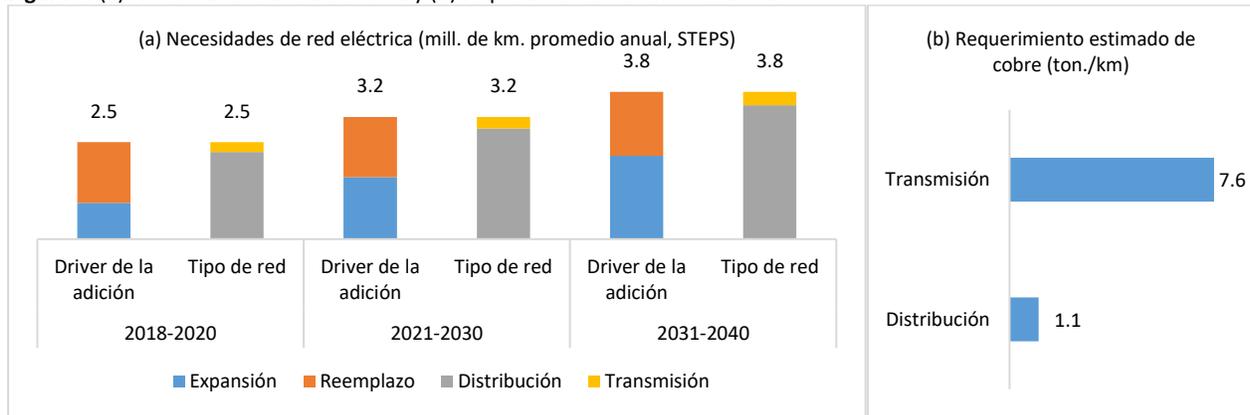
Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de IEA (2021a; 2021b; 2021c; IEA, 2021d), IRENA (2022) y y Seck et al. (2020).

3. Transmisión Eléctrica

Con más de 70 millones de kilómetros de redes eléctricas a nivel mundial (IEA, 2021a), son la piedra angular del sistema. En este respecto, el gráfico (a) de la Figura 8 expone las proyecciones de necesidades de expansión según el driver de la adición (sea de expansión o reemplazo) y el tipo de red eléctrica (sea de distribución o transmisión) en base al promedio anual para los periodos 2018-2020, 2021-2030 y 2031-2040. A nivel de *driver* de la adición, vemos que las expansiones abarcan ligeramente más de la mitad del total en los periodos futuros considerados. A nivel de tipo de adición, priman las redes de distribución.

En paralelo, el gráfico (b) ilustra el requerimiento estimado de cobre por cada kilómetro de red eléctrica. Vemos que las líneas de transmisión, con un requerimiento estimado de 7,6 toneladas por km., son unas siete veces más intensivas en cobre que las de distribución. Un elemento faltante son los transformadores, que también emplean cobre a distintas intensidades dependiendo del voltaje eléctrico considerado.

Figura 8: (a) Necesidades de red eléctrica y (b) requerimiento de cobre estimado



Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de IEA (2021a).

El mayor consumo de electricidad a partir de la electromovilidad junto a una mayor generación eléctrica vía fuentes bajas en emisiones potencialmente supone una expansión en las redes eléctricas. En este respecto, si bien el auge de la electromovilidad en particular puede derivar en expansiones, no es esperable que, al menos en el mediano plazo, esto suponga una presión significativa sobre el sistema a nivel agregado. En efecto, como se ilustra en la Tabla 2 a continuación, la demanda eléctrica a partir de autos eléctricos crecería desde 55 TWh en 2021 a 709 TWh en 2030, lo que supone un aumento en la participación de la demanda del total desde un 0,2% en 2021 a un 2,7% en 2030 (IEA, 2022a)⁷.

⁷ Incluso en modelaciones menos conservadoras donde las ventas de autos eléctricos de pasajeros al 2030 llegasen a representar el 35% de las ventas totales (en lugar del 22% pronosticado en el escenario STEPS), la participación de los autos eléctricos en la demanda eléctrica total sería de menos del 4% (IEA, 2022a).

Tabla 2: Demanda eléctrica atribuible a vehículos eléctricos y participación en relación a demanda total

Jurisdicción	2021		2030	
	TWh	% del total	TWh	% del total
Unión Europea	10	0.3%	213	5.5%
EE.UU.	7	0.2%	117	3.0%
China	28	0.5%	266	3.3%
Japón*	N.D.	0.0%	N.D.	1.3%
India	0	0.0%	23	1.9%
Total	55	0.2%	709	2.7%

Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de IEA (2022a).

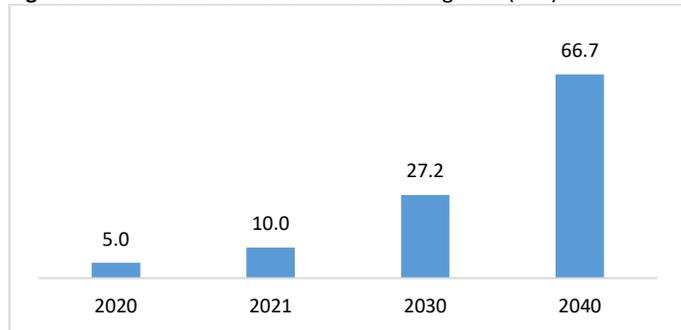
Ahora bien, algunas ciudades o territorios específicos con alta penetración de autos eléctricos y energías renovables podrían experimentar alzas significativas en su demanda eléctrica que exijan expansiones o mejoras en la red. Sin embargo, es de esperar que en el agregado de los principales mercados (China, Estados Unidos y Europa) las redes eléctricas puedan soportar la demanda a partir de electromovilidad sin mayores problemas (IEA, 2022a). Morris (2021) argumenta en favor de esta postura, toda vez que la carga eléctrica vehicular se puede distribuir en el transcurso del día entre distintos usuarios. Asimismo, la adopción de estrategias de carga inteligente y digitalización puede atenuar la necesidad de expansiones o mejoras en el sistema (IEA, 2022a; 2021a).

4. Almacenamiento energético

La naturaleza intermitente de algunas energías renovables como la solar y la eólica plantea el desafío de contar con una disponibilidad energética predecible, segura y flexible para despachar al sistema eléctrico. Ante esto, los sistemas de almacenamiento energético a partir de baterías de ion-litio se han erigido como una solución de prevalencia creciente conforme se ha optimizado la tecnología y han caído los precios de fabricación (Chen, et al., 2020; U.S. Department of Energy, 2019). De igual forma, también se han convertido en una alternativa de uso incipiente y creciente para clientes residenciales y comerciales (BNEF, 2021c). En este contexto, esperamos ver un despegue en la instalación de capacidad.

Como se ilustra en la Figura 9 en 2020, la capacidad de almacenamiento energético en baterías aumentó en 5 GW en 2020. Ya al 2030 se proyectan adiciones cinco veces mayores a 2020, llegando a 27,2 GW. Hacia el 2040, se proyectan adiciones 13 veces mayores, llegando a 66,7 GW. Suponiendo un factor de uso estándar de cuatro horas diarias (EIA, 2022; Cole, Frazier, & Augustine, 2021), esto se traduce en 267 GWh al año.

Figura 9: Adiciones de almacenamiento energético (GW)



Fuente: Cochilco en base al escenario STEPS de IEA (2021e).

III. Metodología

En general la metodología de proyección de demanda de cobre se puede resumir en una simple operación aritmética: la multiplicación de las proyecciones de adiciones de producto (sean ventas de vehículos nuevos, adiciones de cargadores, distancia cubierta por líneas eléctricas y capacidad de almacenamiento energético) por los coeficientes de uso de cobre respectivos aplicando ciertos ajustes en cada caso. Para esto, buscaremos estimar la demanda incremental respecto del escenario hipotético en que no hubiera una transición energética. A continuación explicaremos los supuestos para cada sector en estudio.

1. Electromovilidad

Siguiendo la clasificación del capítulo anterior, nos referiremos a dos fuentes de demanda de cobre: (a) el cobre en la fabricación de vehículos eléctricos y (b) el cobre en cargadores.

a. Vehículos eléctricos

Estimamos la demanda incremental de cobre a partir de dos pasos, que describimos a continuación.

Paso 1: Proyección de la demanda agregada de cobre por ventas de vehículos nuevos

A partir de la proyección de ventas de vehículos nuevos por categoría expuesta en la Figura 2 y medio junto al consumo estimado de cobre explicitado en la Figura 4, obtenemos la demanda agregada de cobre. Esto se representa en la ecuación a continuación.

$$E(Cu_{x,y,t}) = E(Ventas_{y,t}) * E(Cu_{x,y,t})$$

Donde x representa la categoría de vehículo (sea BEV, PHEV o FCEV), y representa el medio vehicular (sea auto, van, bus, camión, camión, vehículos de 2/3 ruedas o bicicleta) y t representa el año considerado.

Considerando que es razonable esperar que el consumo de cobre por unidad tienda a disminuir en el tiempo conforme se avanza en densidad energética de las baterías y se optimiza la arquitectura vehicular, supondremos en base a Citi Research (2021)⁸ que al 2030 el consumo unitario de cobre cae un 30% para todos los NEV (BEV, PHEV y FCEV) de cuatro ruedas o más respecto de 2020, reducción que al 2040 se extendería hasta 40%. En dicho año, supondremos, además, que se logran reducciones de 10% y 5% en los vehículos de 2/3 ruedas así como en bicicletas eléctricas respectivamente. En contraste, para los ICEV y HEV supondremos que no hay disminución alguna en tanto que se trataría de una industria madura.

Paso 2: Estimación de la demanda incremental de cobre por vehículos eléctricos

Es razonable suponer que cada NEV actúa como sustituto de su categoría en relación a la de combustión interna. De tal forma, para estimar la demanda incremental de cobre a partir de electromovilidad, debemos considerar el valor diferencial entre las unidades de su misma categoría. De esta forma, la demanda incremental de cobre a partir de electromovilidad se puede estimar del siguiente modo:

$$E(Cu \text{ Incremental}_{x,y,t}) = E(Ventas_{y,t}) * E(Cu_{x,y,t} - Cu_{ICE,y,t})$$

⁸ Específicamente, hacia el 2030 Citi Research (2021) estima reducciones en el consumo unitario de cobre de 83 kg a 60 kg (-28%) para los BEV y de 60 kg a 40 kg (-33%) para los PHEV.

Así, por ejemplo, si en 2021 el consumo de cobre de un BEV y un ICEV de tamaño pequeño es de 83 y 23 kg de cobre respectivamente, tenemos un consumo neto de 60 kg por unidad. Luego replicamos esta operación para el resto de los medios y categorías y las consideramos en su conjunto.

Por último, dada que la proyección de consumo de cobre en vehículos eléctricos depende inexorablemente de las proyecciones de penetración de la industria en el tiempo, añadiremos un escenario potencial al 2040 en que la penetración alcanza el 100%. Es decir, que todas las ventas son de NEV. Este escenario solo tendrá fines comparativos.

b. Cargadores

A partir de la proyección de adiciones de cargadores expuesta en la Figura 6.b junto a la estimación de uso de cobre por tipo de cargador en la Tabla 1, computamos la demanda de cobre. Supondremos que el 90% de los cargadores privados son de tipo 1 (2 kg Cu) y el resto de tipo 2. Para el caso los cargadores públicos lentos, ocupamos el tipo 2 (7 kg Cu); y para los públicos de alta velocidad, los DCFC (25 kg Cu).

2. Energías bajas en emisiones

De un modo similar a la metodología expuesta para estimar el cobre requerido en vehículos eléctricos, para las energías bajas en emisiones multiplicamos las adiciones de capacidad anuales por tipo de energía en el escenario STEPS y los factores de uso de cobre de cada una (véase Figura 7). Por ejemplo, si en 2020 se realizaron adiciones por 108 GW de energía eólica terrestre y esta requiere de 2,8 toneladas de cobre por MW de capacidad, aproximaremos la demanda de cobre a 302.400 ($108 \times 2,8 \times 1000$) toneladas. Replicando este método para todas las energías, obtenemos la demanda de cobre agregada del sector.

3. Red eléctrica

IEA (2021a) proyecta que al 2040 alrededor de un 50% y 35% de las expansiones de redes de transmisión y distribución respectivamente se atribuyen a energías renovables. De tal forma, para obtener la demanda incremental multiplicamos estas proporciones estimadas por las proyecciones de expansiones de redes eléctricas y el coeficiente de uso de cobre por kilómetro de red eléctrica (véase Figura 8). Por último, para el consumo de cobre en transformadores, ocuparemos las proyecciones de IEA (2021a).

4. Almacenamiento energético

Suponiendo una duración promedio estándar de 4 horas diarias (EIA, 2022; Cole, Frazier, & Augustine, 2021), la capacidad anual 2020 de 5 GW expuesta en la Figura 9 se traduce a 20 GWh. Luego, considerando que distintas tecnologías de cátodos típicamente fluctúan en torno a un promedio de 0,4 kg de cobre por kWh, podemos estimar el consumo de cobre a partir de la multiplicación de ambos valores, lo que arroja 8.000 toneladas en 2020. Para los años 2030 y 2040 supondremos que esta capacidad de horas se incrementa en 10% y 20% respecto de 2020 respectivamente, manteniendo el factor de 0,4 kg/kWh previamente mencionado.

IV. Resultados

Siguiendo la metodología expuesta previamente, en esta sección se presenta la demanda incremental de cobre por electromovilidad, energías bajas en emisiones, red eléctrica y almacenamiento energético, así como sus respectivas proyecciones de demanda al 2025, 2030 y 2040.

1. Electromovilidad

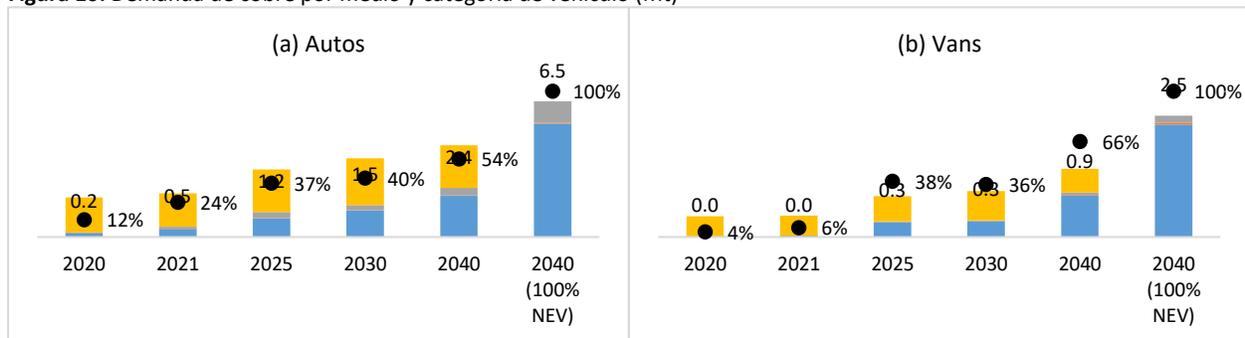
a. Vehículos eléctricos

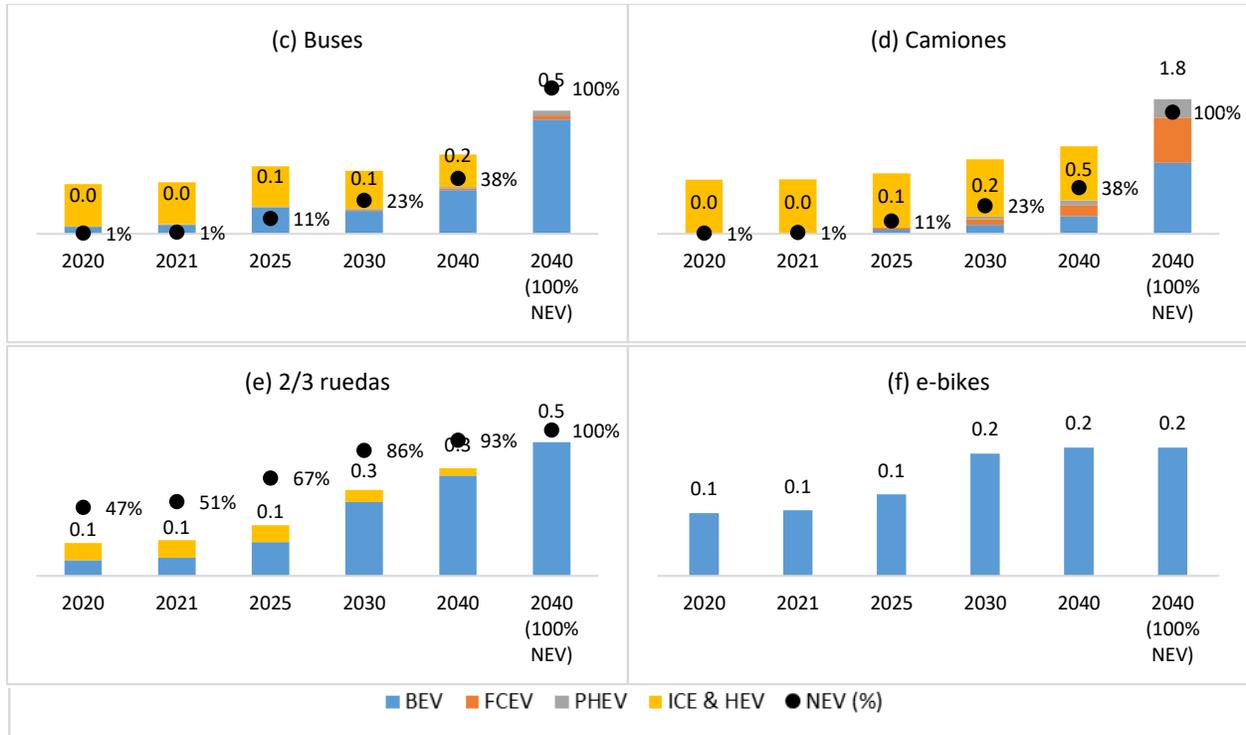
La Figura 10 ilustra la demanda de cobre para cada medio y categoría de transporte considerada, incluyendo vehículos de combustión interna. Vemos del gráfico (a) que la categoría de autos (vehículos livianos de pasajeros) es la principal fuente de demanda, creciendo desde 168 kt en 2020 hasta 1,5 Mt al 2030 y luego 2,4 Mt al 2040 (+12,4% CAGR respecto de 2020). A este sector le siguen (b) las vans, cuya demanda de cobre crecería desde 15,7 kt en 2020 hasta 342,3 kt en 2030 y 920,5 en 2040 (+22,6% CAGR respecto de 2020). En ambos medios de transporte, la demanda de cobre a partir de autos eléctricos o NEV representaría más de la mitad del total hacia el 2040 (54% y 66% respectivamente).

En contraste, en el segmento de vehículos pesados, considerando (c) buses y (d) camiones, esperamos que la demanda de cobre a partir de NEV solo represente en torno al 38% hacia el 2040, dando cuenta de una transición más lenta en estos medios. Caso contrario es el de los (e) vehículos de dos o tres ruedas, donde a partir de su rápida adopción esperada, proyectamos que al 2040 el 93% de la demanda de cobre provenga de medios eléctricos. Por último, en el caso de las (f) *e-bikes*, la demanda de cobre se doblaría desde 86 kt en 2020 hasta 176 kt al 2040.

Cabe señalar que del escenario potencial en que 100% de las ventas sean eléctricas al 2040 (última columna de cada gráfico), vemos que la demanda de cobre a partir de (a) autos alcanza los 6,5 Mt, lo cual supera la suma de las demandas individuales de todos los otros medios. Esto refuerza la importancia que tiene la sustitución efectiva a nivel poblacional de los autos de combustión interna por autos eléctricos sobre la demanda de cobre.

Figura 10: Demanda de cobre por medio y categoría de vehículo (Mt)



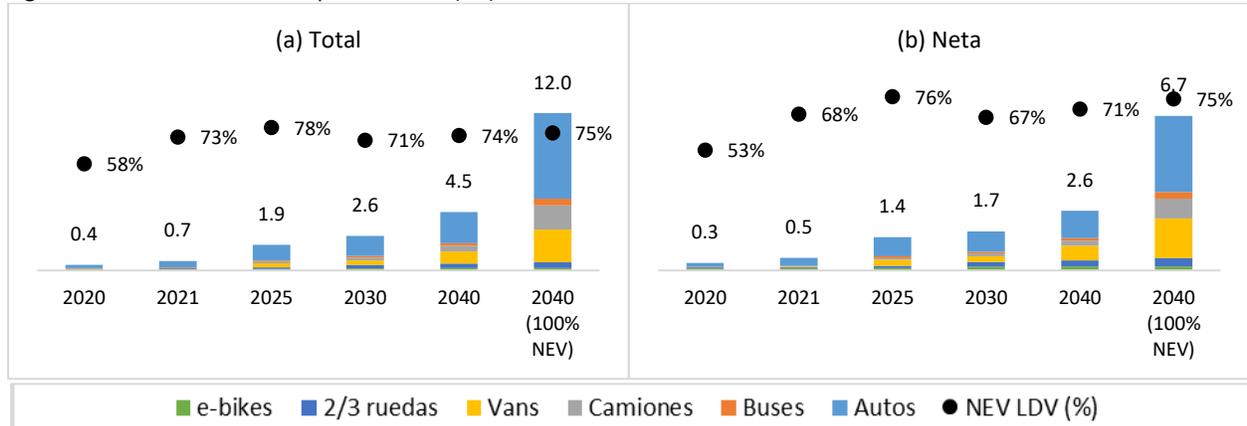


Fuente: Cochilco.

El gráfico (a) de la Figura 11 a continuación agrega en un solo gráfico las proyecciones de demanda de cobre a partir de NEV expuestas anteriormente. Vemos que la demanda total a partir de NEV crecería de 416,6 kt en 2020 a 2,6 Mt en 2030 y luego 4,5 Mt en 2040 (+12,6% CAGR respecto de 2020). Es decir, 11 veces más que en 2020. Ya en el escenario potencial de 100% de ventas NEV al 2040 se alcanzarían los 12 Mt, lo que equivale a casi 30 veces más que en 2020. Se puede destacar que los NEV livianos, comprendiendo vehículos de pasajeros y vans, constituyen el grueso de la demanda, representando sobre el 70% del total en los años proyectados. En particular, los autos de pasajeros son el principal driver, concentrando sobre el 50% en cada año, y el 54% en el escenario potencial de 100% de ventas NEV al 2040.

En paralelo, del gráfico (b) de la misma figura expone la demanda neta o incremental de cobre a causa de las ventas de NEV. Es decir, esencialmente la demanda de cobre por las ventas de vehículos eléctricos suponiendo que sustituyen unidad por unidad a los de vehículos de combustión interna. Vemos las cifras netas de (b) son lógicamente menores en relación a las totales o brutas de (a) para cada año considerado, llegando a 1,7 Mt al 2030 (en lugar de 4,5 Mt), 2,6 Mt al 2040 (en lugar de 4,5 Mt) y 6,7 Mt en el escenario potencial al 2040 (en lugar de 12,0 Mt). Es decir, al considerar la demanda incremental, tenemos una reducción entre 22-44% dependiendo del año en análisis. Naturalmente, mientras más nos alejamos en el tiempo, mayor resulta el peso de la sustitución y por ende mayor es la diferencia proporcional entre la demanda total y la incremental.

Figura 11: Demanda de cobre a partir de NEV (Mt)



Fuente: Cochilco.

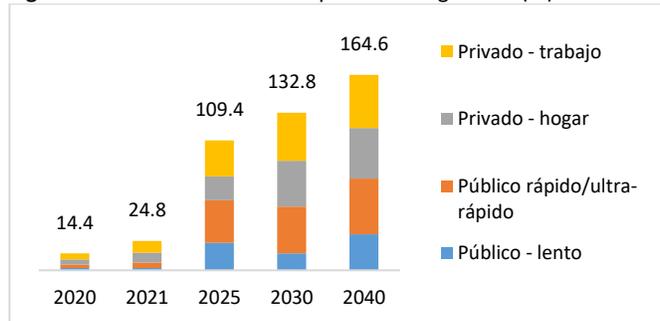
b. Cargadores

Como se desprende de la Figura 12, proyectamos que el consumo de cobre total en cargadores crezca desde 14,4 kt en 2020 a 132,8 kt en 2030, y alcance 164,6 kt en 2040 (+13,0 CAGR respecto de 2020). Es decir, unas 11 veces más que en 2020.

Cabe explicitar que en esta figura no ilustramos el escenario hipotético al 2040 en que todos los vehículos fueran NEV en tanto en este escenario la industria estaría teóricamente en un estado estacionario sin necesidad de añadir infraestructura de carga más allá de reemplazos y posibles adiciones relativamente

menores por aumentos en el tamaño de mercado a partir de expansiones urbanas e interurbanas y mejoras de eficiencia.

Figura 12: Demanda de cobre a partir de cargadores (kt)

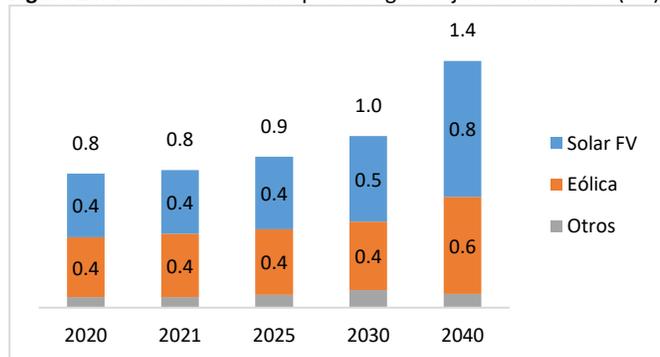


Fuente: Cochilco.

2. Energías bajas en emisiones

Como vemos en La Figura 13 a la derecha, esperamos que la demanda de cobre a partir de energías bajas en emisiones crezca desde 785,6 kt en 2020 a 1,0 Mt en 2030 y posteriormente 1,4 Mt en 2040 (+3,1% CAGR respecto de 2020). Dentro de este total, la principal fuente de demanda provendría de su uso en paneles fotovoltaicos, creciendo de 374,1 kt en 2020 a 795,2 al 2040 Mt (+3,8% CAGR), seguido de energía eólica de 350,4 kt a 569,1 kt en el mismo periodo (+2,5% CAGR).

Figura 13: Demanda de cobre por energías bajas en emisiones (Mt)

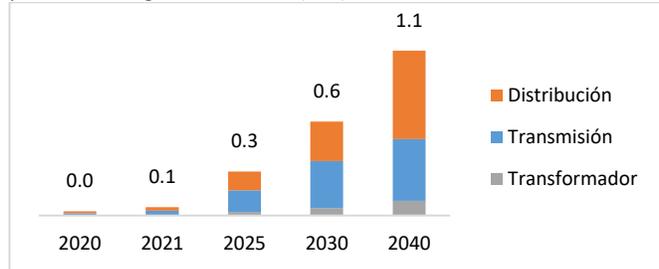


Fuente: Cochilco.

3. Red Eléctrica

Como se observa en la Figura 14, la demanda de cobre a raíz de expansiones en la red eléctrica atribuibles a energías renovables crecería desde 27,1 kt en 2020 a 1,1 Mt al 2040 (+20,2% CAGR). Este total al 2040 se explicaría fundamentalmente a partir de expansiones en distribución y transmisión con 306,6 kt y 257,4 kt respectivamente, representando conjuntamente el 92% del total al 2040.

Figura 14: Demanda de cobre por expansiones en la red eléctrica a partir de energías renovables (Mt.)

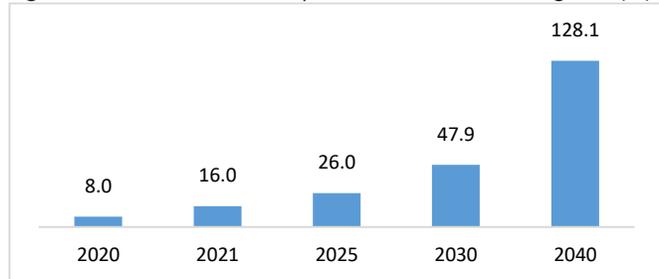


Fuente: Cochilco.

4. Almacenamiento energético

Como se aprecia en la Figura 15, esperamos que la demanda de cobre a partir de almacenamiento energético aumente desde 8,0 kt en 2020 a 47,9 kt al 2030 y luego 128,1 kt al 2040 (+14,9% CAGR respecto de 2020). Es decir, unas 16 veces que en 2020.

Figura 15: Demanda de cobre por almacenamiento energético (kt)



Fuente: Cochilco.

5. Total

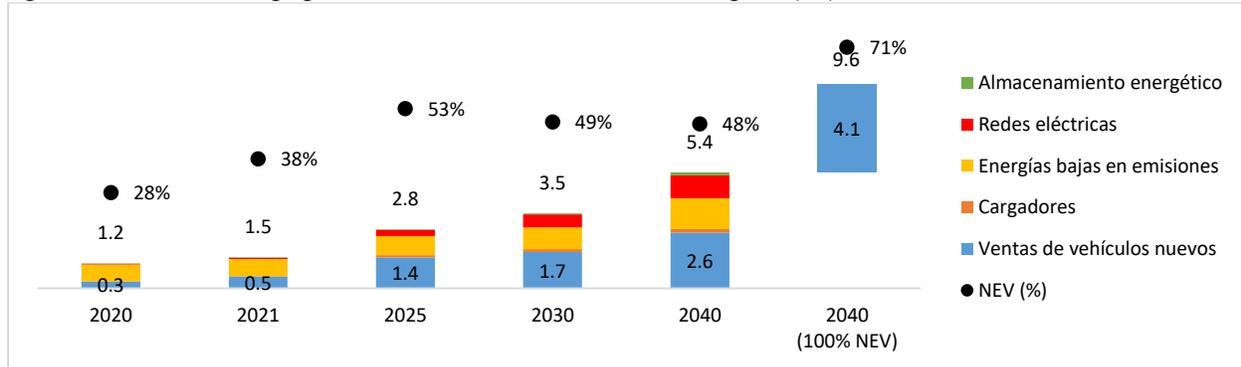
a. Demanda total incremental

Agregando todos los resultados previamente presentados, la Figura 16 ilustra la proyección de demanda incremental o neta a causa de electromovilidad (considerando nuevamente tanto NEV como cargadores), energías bajas en emisiones, redes eléctricas y almacenamiento energético. Se observa en primer lugar que la demanda crecería desde 1,2 Mt en 2020 a 2,8 Mt en 2025, 3,5 Mt en 2030 y 5,4 Mt en 2040 (+8,0% CAGR respecto de 2020). Es decir, se multiplicaría por cinco veces hacia 2040. De la última columna vemos que si consideráramos el escenario hipotético en que al 2040 el 100% de las ventas de automóviles sean eléctricos o NEV, sumaríamos 4,1 Mt adicionales, llegando a una demanda total neta de 9,6 Mt.

En la demanda agregada vemos, además, que ya a mediados de la próxima década el total de NEV alcanza la mayoría absoluta en la participación en la demanda por transición energética. En efecto, crece del 28% en 2020 al 53% en 2025 para luego mantenerse en torno a la mitad del total en 2030 y 2040. En el escenario potencial en que el 100% de las ventas correspondiesen a NEV manteniendo todos los otros segmentos de demanda iguales al 2040, se alcanzaría el 71%. Esto refuerza un punto que ya se anticipaba a partir de los resultados anteriores: la demanda incremental a partir de la transición energética está fundamentalmente impulsada por el auge de los vehículos eléctricos.

A los vehículos eléctricos le siguen las energías bajas en emisiones con 1,4 Mt al 2040, equivalente al 27% del total, y las redes eléctricas con 1,1 Mt, igual al 20% del total. Por último, la demanda de cobre derivada de adiciones de cargadores para vehículos eléctricos y las adiciones de almacenamiento energético tendría participaciones minoritarias de 3% y 2% del total respectivamente hacia el 2040.

Figura 16: Demanda neta agregada de cobre atribuible a la transición energética (Mt)



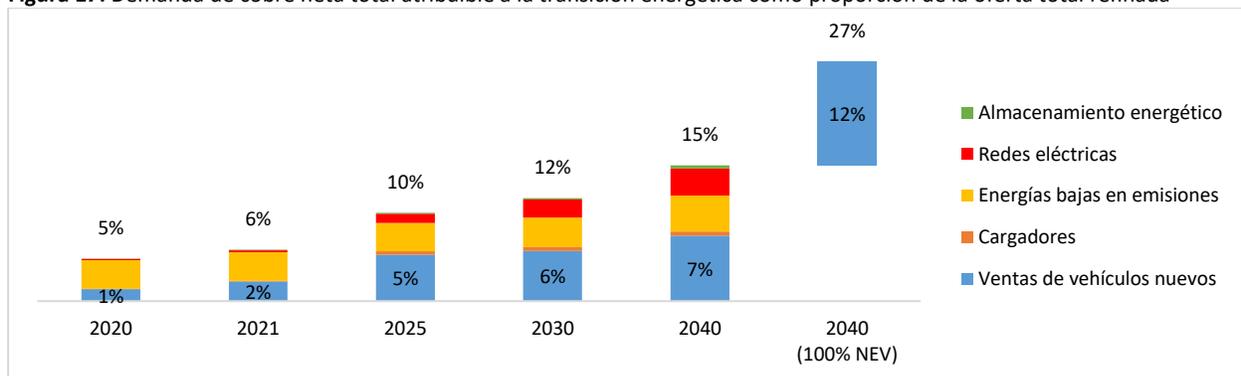
Fuente: Cochilco.

b. Demanda total neta en relación a la oferta

Que la demanda neta agregada se incremente a 5,4 Mt en 2040 se traduce en aproximadamente cinco veces la producción de Minera Escondida durante 2021, la principal faena de cobre del mundo (responsable de una veinteva parte de la producción mina mundial), o aproximadamente toda la producción de Chile de ese mismo año (equivalente a más de un cuarto de la producción mina mundial).

De igual forma, podemos evaluar la importancia de la demanda neta proyectada sobre la producción refinada esperada total (considerando tanto primaria como secundaria) en cada año. Sobre este punto la Figura 17 ilustra la demanda neta anual anteriormente expuesta como proporción de la oferta total refinada. Vemos que esta proporción se doblaría desde un 5% en 2020 a un 10% en 2030, y luego se triplicaría al 15% en 2040. En el escenario potencial en que el 100% de las ventas anuales de autos sean eléctricos al 2040, se llegaría a más de cuarto del total.

Figura 17: Demanda de cobre neta total atribuible a la transición energética como proporción de la oferta total refinada



Fuente: Cochilco en base a Wood Mackenzie (2022).

Estas expectativas de crecimiento suponen en el mediano y largo plazo una presión significativa sobre la capacidad productiva mundial, lo que refuerza la importancia de la transición energética sobre la industria del cobre. Que la producción cuprífera, tanto a nivel primario como secundario, pueda dar abasto a los incrementos de demanda esperada sin involucrar alzas prohibitivas en los precios o que induzcan fuertemente a la sustitución por otros materiales será uno de los desafíos de la industria.

Cabe señalar que todas estas proyecciones dependen fundamentalmente de las proyecciones del escenario STEPS de la IEA subyacente. Naturalmente, desviaciones en ventas y adiciones de capacidad repercutirán en las estimaciones de demanda de cobre de nuestro modelo. En este sentido, al tratarse de mercados relativamente nuevos y aún en etapa de maduración, la probabilidad de que existan variaciones significativas es significativa, especialmente al proyectar a un periodo relativamente alejado como el 2040. Más aun, considerando que las proyecciones del escenario STEPS se basan esencialmente en políticas establecidas, las cuales pueden ser ajustables en el tiempo.

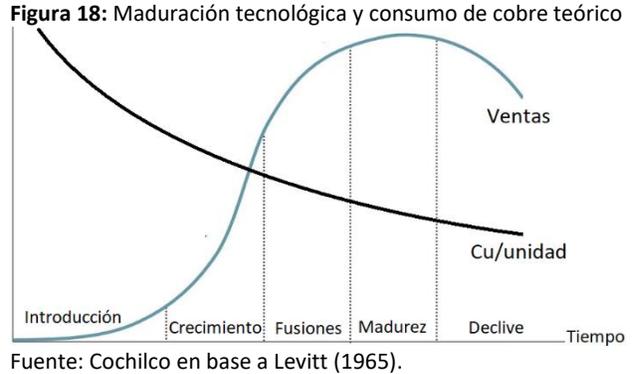
En particular, dado el creciente interés por mitigar los efectos del cambio climático, resultaría esperable que con el paso del tiempo se agreguen nuevas políticas o bien que las ya existentes se profundicen o adelanten en sus plazos. En este contexto, el escenario STEPS se puede comprender como una base relativamente conservadora para nuestras proyecciones.

Ahora bien, sí existen riesgos significativos a nuestras proyecciones tanto a nivel de uso unitario de cobre como de adopción a escala poblacional, algunos de los cuales se hacen especialmente puntudos en el sector de la electromovilidad. Discutiremos algunos de estos riesgos en el capítulo a continuación.

V. Riesgos a la proyección

Los resultados descansan en gran parte en intensidades estimadas de consumo de cobre. Sin embargo, considerando que, con excepción de las redes eléctricas, se trata de industrias relativamente nuevas, es probable que su consumo unitario de cobre y otras materias primas tienda a decrecer en el tiempo.

En un nivel teórico, siguiendo la teoría de maduración de las industrias de Levitt (1965), esto se puede graficar a partir de la Figura 18, donde a medida que la industria madura tecnológicamente, los oferentes tienden a optimizar el producto en función de su desempeño y costos. Así, a medida que la industria incrementa sus ventas y se consolida, esperaríamos ver un menor consumo unitario de materias primas, incluyendo el cobre.



Si bien la tendencia a reducir el consumo unitario de cobre puede ocurrir en todos los sectores de la transición energética, incluyendo en sectores conocidos y consolidados como la infraestructura eléctrica, puede resultar especialmente determinante en los vehículos eléctricos dada su importancia dentro del consumo de cobre y su historia de sustitución considerando la industria automotriz en general⁹. En consecuencia, a continuación nos detendremos exclusivamente en esta industria y sus riesgos atingentes a un eventual menor uso de cobre por unidad. Luego, considerando que la proyección también depende fuertemente del nivel de ventas, analizaremos riesgos atingentes al volumen de vehículos eléctricos.

1. Riesgos al uso de cobre por unidad de vehículo eléctrico

a. Tecnologías de cátodo

Como se ilustró en la Figura 5, el contenido de cobre en la batería del vehículo representa en torno al 50% del cobre total en un vehículo eléctrico liviano de pasajeros y alrededor del 80% en un bus eléctrico. Dada la importancia del cobre en la batería, cualquier variación en la composición química de la batería podría conducir a desviaciones significativas en la demanda de cobre.

En general sucede que a mayor densidad energética de la celda, la intensidad de cobre requerido en la misma decrece. Así, Jiao (2019) estima que mientras que al nivel de la celda un cátodo NMC111 emplea 0,611 kg de cobre por kWh, uno del tipo NMC811 usa 0,462 kg/kWh. Luego, computando el uso de cobre en una batería de 75 kWh de capacidad, el cobre en las celdas ascendería 35 kg o 46 kg en un caso u otro. Es decir, habría una reducción de 24% entre un tipo de tecnología y otro dentro de la formulación NMC. Hacia el 2030, IEA (2021a) espera que los cátodos del tipo NMC811 sean de uso dominante en el mercado de autos eléctricos de pasajeros en desmedro de otros tipos NMC con participaciones actualmente significativas (NMC111, NMC622, NMC532), lo que redundaría en un menor consumo de cobre por unidad.

⁹ En los 60s y 70s, los fabricantes sustituyeron cobre por aluminio en radiadores, tuberías de precisión y otros elementos. Si bien los esfuerzos en sustitución persisten, la facilidad de conseguirlos e implementarlos es progresivamente menor (Cochilco, 2020).

b. Grosor de las láminas de cobre

Los fabricantes de láminas de cobre están continuamente apuntando hacia la reducción de su grosor a fin de aumentar la densidad energética de la celda, aminorar el peso inactivo dentro del vehículo y reducir los costos. En las celdas de baterías de vehículos eléctricos, si bien hace algunos años primaban las láminas de 8-10 micrones de grosor, hoy ya varios fabricantes emplean grosores de 6-8 micrones y hay esfuerzos en pro de reducciones adicionales (Jiao, 2019). Por ejemplo, a mediados de la década pasada el fabricante chino Wah Wei Copper Foil anunció que a partir de 2017 el 95% de su capacidad se concentraría en 8 micrones y en 2020 comenzó la producción en masa de láminas de 4,5 micrones (Asian Metal, 2020). A nivel local, Chile cuenta con al menos un proyecto de láminas de cobre de 5 micrones con uso en baterías y sistemas de almacenamiento energético (Diario Financiero, 2022). Estos avances tienen un impacto significativo sobre la demanda en tanto suponen un menor consumo de cobre a nivel de la celda de hasta 55%.

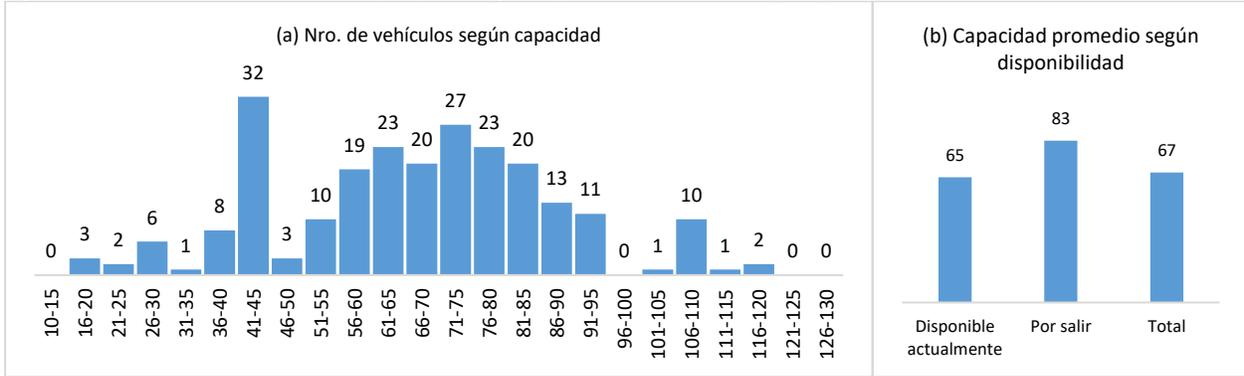
Con todo, el prospecto de uso de láminas de cobre en vehículos eléctricos es una tendencia a la cual están buscando responder los fabricantes. Así, a nivel global, Wood Mackenzie (2022) reporta que solo en 2021 se comprometieron inversiones para aumentar la capacidad de producción de láminas de cobre en al menos un millón de toneladas por año.

c. Capacidad de las baterías de ion-litio

Vimos previamente que el consumo de cobre al nivel de la celda del cátodo puede medirse a partir de kg de cobre por kWh de capacidad de la batería de ion-litio. Tal como este ratio puede decrecer conforme se propende hacia una mayor densidad energética del cátodo, es esperable que la capacidad total se incremente en la medida en que los fabricantes logren mayores autonomías vehiculares, lo que se traduciría en un mayor consumo de cobre por vehículo. Se trata de una tendencia que, en efecto, ya ha ocurrido en la práctica. Por ejemplo, mientras que el antiguo modelo Nissan LEAF tenía una capacidad de 24 kWh permitiendo 135 km de autonomía, el último modelo LEAF e+ cuenta con 59 kWh, permitiendo 340 km de autonomía (Electric Vehicle Database, 2022).

A partir de datos de 235 modelos de distintas marcas de BEV livianos de pasajeros actualmente comercializados o prontos a entrar al mercado en Alemania, Holanda y Reino Unido disponibles en Electric Vehicle Database (2022), vemos de la Figura 19 que la capacidad de baterías se ubica mayoritariamente entre 56-95 kWh, con 156 modelos (66% del total), siendo el rango entre 71-75 kWh el de mayor frecuencia con 27 modelos. En paralelo, de entre el total de 235 modelos considerados, 203 corresponden a vehículos actualmente en venta y 32 aún no disponibles en el mercado, con una capacidad promedio de 65 kWh y 83 kWh respectivamente, lo que sugiere que la tendencia por incrementar la autonomía persiste.

Figura 19: Número de BEV livianos de pasajeros según capacidad de su batería (kWh)



Fuente: Cochilco en base Electric Vehicle Database (2022).

d. Menor uso de cobre en otros elementos de la arquitectura vehicular

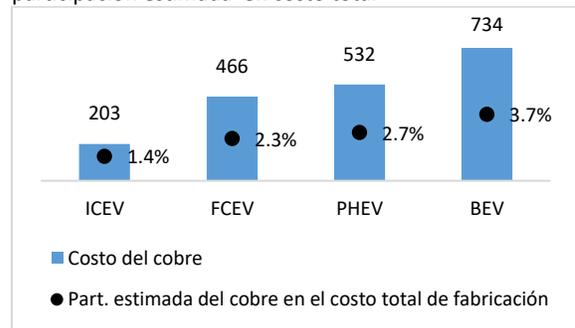
Considerando que alrededor de la mitad del cobre de un vehículo eléctrico liviano de pasajeros se utiliza en elementos externos a la batería de ion litio, es esperable que exista una búsqueda por reducir o sustituir parcialmente el uso de cobre dentro de toda la arquitectura vehicular. Asimismo, en la medida en que un mayor número de fabricantes automotrices dedique espacios exclusivos a la fabricación de vehículos eléctricos en lugar de plataformas industriales readaptadas a partir de producción de automóviles de combustión interna (BNEF, 2021a), es posible esperar una reducción en el consumo total de materias primas, incluyendo cobre, en toda la arquitectura vehicular.

e. Precio de largo plazo del cobre

Lo anterior puede verse particularmente afectado por un mayor precio del cobre. En efecto, mientras mayor sea el precio de largo plazo del cobre, mayores serán los incentivos para realizar esfuerzos en esta dirección, lo que llevaría a que el uso de cobre por unidad de vehículo eléctrico tendiese a disminuir.

En la Figura 20 se ilustra el costo estimado de cobre ocupando un precio de USD/lb 4,0 en un vehículo de pasajeros pequeño en las categorías de BEV, PHEV, FCEV e ICEV según los consumos promedio expuestos en la Figura 4, así como la participación estimada en el costo unitario de producción total. Vemos que en el caso del BEV, el costo del cobre ascendería a USD 825 por unidad y representaría el 3,7% del costo unitario total. Es decir, si un fabricante produjera un millón de BEV al año¹⁰, el costo del cobre como insumo ascendería a USD 734 millones. Si se lograra reducir el uso de cobre en apenas un kilogramo, conseguiría un ahorro de USD 8,8 millones.

Figura 20: Costo del cobre (USD) en un vehículo eléctrico y participación estimada en costo total*



*Suponiendo un automóvil de pasajeros pequeño, un precio del cobre de USD/lb 4,5 y costos de fabricación de USD 15.000 para ICEV y USD 20.000 para FCEV, PHEV y BEV. Fuente: Cochilco.

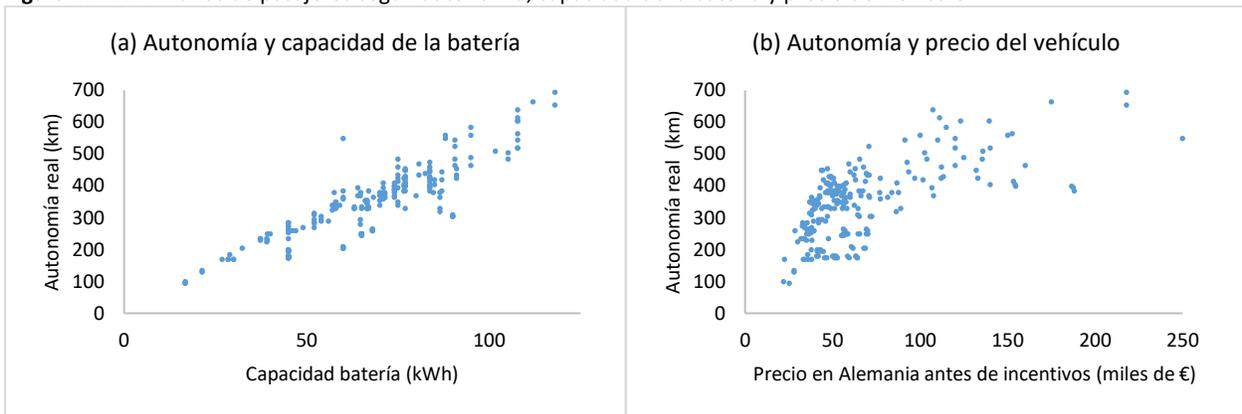
¹⁰ Como referencia, en 2021 Tesla, el mayor fabricante, vendió 940.000 unidades y aspira vender 20 millones al 2030 (Tesla, 2022).

2. Riesgos atingentes a las ventas totales de vehículos eléctricos

a. Precios y costos de los vehículos eléctricos en relación a los de combustión interna

Como mencionamos previamente, el aumento en la capacidad de las baterías ha sido una de las tendencias prevalentes en la industria en tanto permite una mayor autonomía vehicular. Actualmente ya existen varios modelos con capacidades de 100 kWh o más, los cuales en general permiten autonomías reales mayores a 500 km, situándose en un rango equiparable a los automóviles de combustión interna (véase (a) de la Figura 21). Sin embargo, en general sucede que a mayor capacidad aumentan los costos de producción y luego potencialmente los precios de venta. En este sentido, incrementar la capacidad (y por ende la autonomía) de forma económicamente competitiva frente a los automóviles de combustión interna es uno de los principales desafíos de la industria en los próximos años en aras de propender hacia una mayor penetración de los vehículos eléctricos.

Figura 21: BEV livianos de pasajeros según autonomía, capacidad de la batería y precio del vehículo



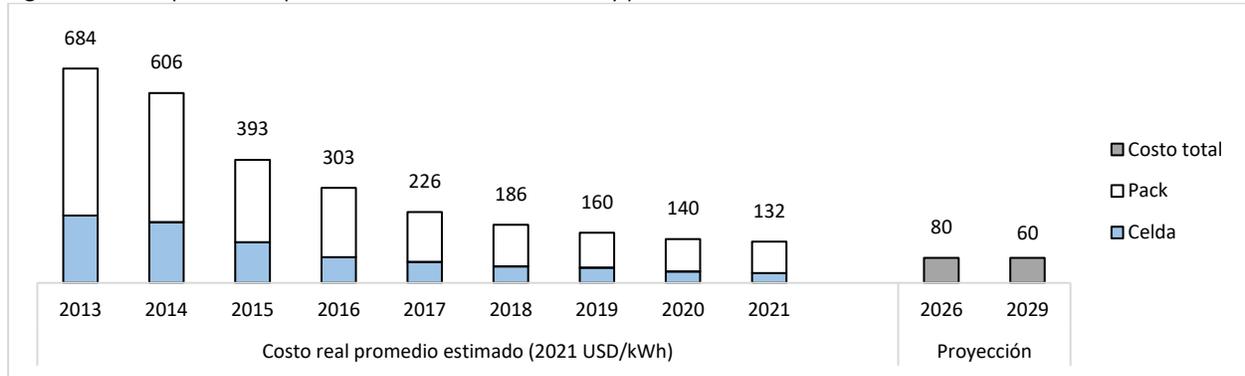
Fuente: Cochilco en base Electric Vehicle Database (2022).

Conseguir esta paridad en los precios (sin la necesidad de incentivos gubernamentales) dependerá en gran parte de reducciones en los precios de las baterías, que actualmente representan más de un tercio del costo de fabricación directo de un vehículo eléctrico. En este contexto, como se observa de la Figura 22, de acuerdo a estimaciones de BNEF (2021a; 2021b), los costos reales medidos en dólares de 2021 por kWh de capacidad han caído significativamente desde 684 en 2013 a 132 en 2021 y se espera que caigan a 80 y 60 hacia 2026 y 2029 respectivamente, lo que facultaría una paridad en los costos frente a automóviles de combustión interna a nivel mundial¹¹.

Esta reducción en el costo de las baterías junto con eventuales optimizaciones en toda la arquitectura vehicular a partir de que los fabricantes dediquen plataformas exclusivas para la producción de vehículos eléctricos en lugar de readaptar espacios ya existentes para la producción de vehículos de combustión interna, permitiría –de acuerdo a estimaciones de BNEF (2021a)– lograr incluso menores costos totales directos hacia 2030 (véase Figura 23).

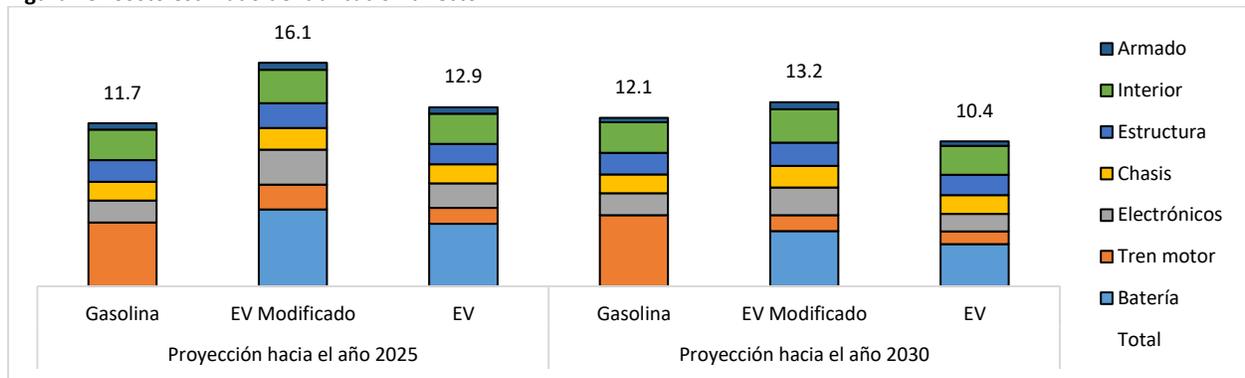
¹¹ Esto dependerá en gran parte del precio de distintas materias primas usadas en la fabricación de baterías, como el litio, el níquel y por su puesto el cobre.

Figura 22: Costo ponderado por volúmenes de venta de celda y pack de batería



Fuente: Cochilco en base a BNEF (2021a; 2021b).

Figura 23: Costo estimado de fabricación directo



Fuente: Cochilco en base a BNEF (2021a; 2021b).

b. Comportamiento de la gobiernos

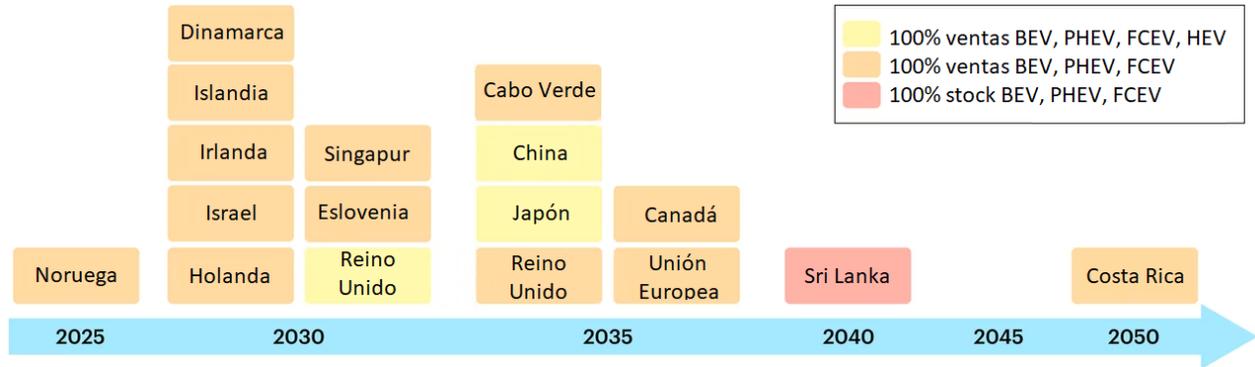
Como se ilustra en la Figura 24, existen varias jurisdicciones con planes concretos y ambiciones de sustituir por completo la venta de vehículos nuevos de combustión interna por vehículos bajos en emisiones. Noruega, el país más avanzado en la materia donde ya en 2021 el 86% de sus ventas de autos fueron eléctricos, cuenta con la meta de alcanzar el 100% hacia el 2025.

Dentro de los principales mercados, destaca China y la Unión Europea, ambos con metas de lograr el 100% hacia 2035¹². Hacia ese mismo año, Japón, Canadá y Reino Unido cuentan con sus propias metas de llegar al 100% en base a distintos tipos de vehículos bajos en emisiones. Estados Unidos cuenta la meta nacional de alcanzar el 50% de ventas de vehículos bajos en emisiones hacia el 2030 (Reuters, 2021). No obstante, estados individuales como Nueva York, California y Massachusetts aspiran a alcanzar el 100% hacia el 2035, mientras que varios otros estados cuentan con metas propias hasta 2050 (BNEF, 2021b).

En mercados pequeños en Latinoamérica, se cuenta a Chile que en su Estrategia Nacional de Electromovilidad declara la meta de llegar al 100% hacia el 2035 (Ministerio de Energía, 2022), y Costa Rica, que aspira a que el 95% de su flota privada sea eléctrica (Rodríguez-Zúñiga, et al., 2021).

¹² China busca que al menos la mitad de sus ventas al 2035 sean BEV, PHEV y PCEV, y el remanente, HEV (WEF, 2020).

Figura 24: Compromisos y ambiciones de alcanzar un 100% de ventas de vehículos livianos bajos en emisiones

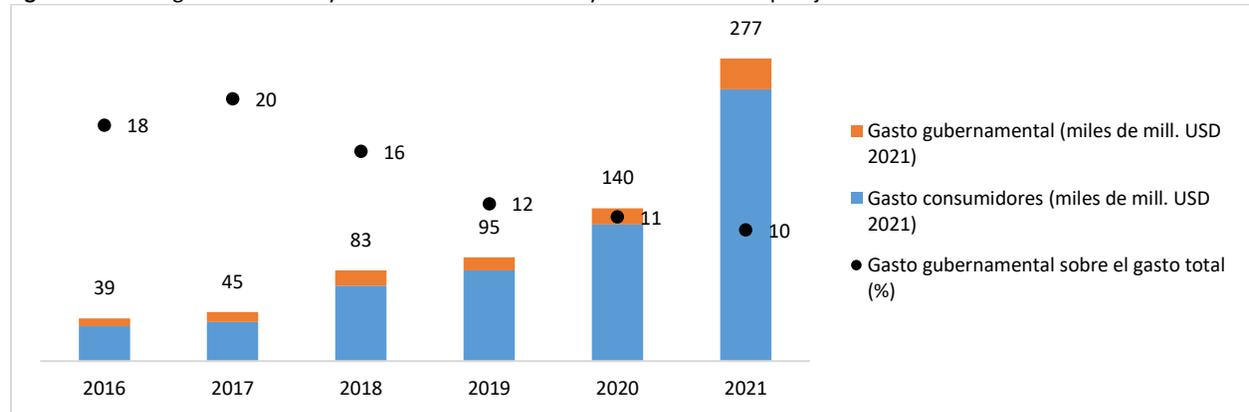


Fuente: Cochilco en base a IEA (2021d).

En este contexto, considerando que uno de los mayores desafíos percibidos para la adopción de vehículos eléctricos radica en su alto precio en relación a los vehículos de combustión interna (Cohen A. , 2022), los gobiernos de las principales economías del mundo han adoptado una serie de políticas públicas a fin de incentivar tanto la producción como el consumo. A nivel de consumo, se destacan distintas modalidades de subsidios y exenciones tributarias.

De acuerdo a datos de la IEA (2022a) expuestos en el gráfico (a) de la Figura 25, a nivel mundial el gasto en BEV y PHEV ha crecido desde 39 mil millones de dólares en 2016 a 277 mil millones de dólares en 2021. Sin embargo, la proporción del gasto gubernamental dentro del total ha decaído de 18% a 10% en el mismo periodo. A nivel de gasto gubernamental unitario, vemos de la Figura 26 que su historia ha sido variable entre las principales jurisdicciones del mundo. En efecto, si bien en Europa se ha mantenido relativamente estable en torno a los 5.200-5.800 dólares por unidad vendida durante 2016-2021, en China ha decaído progresivamente desde un promedio de 12.500 dólares por unidad en 2016 hasta 3.750 en 2021¹³.

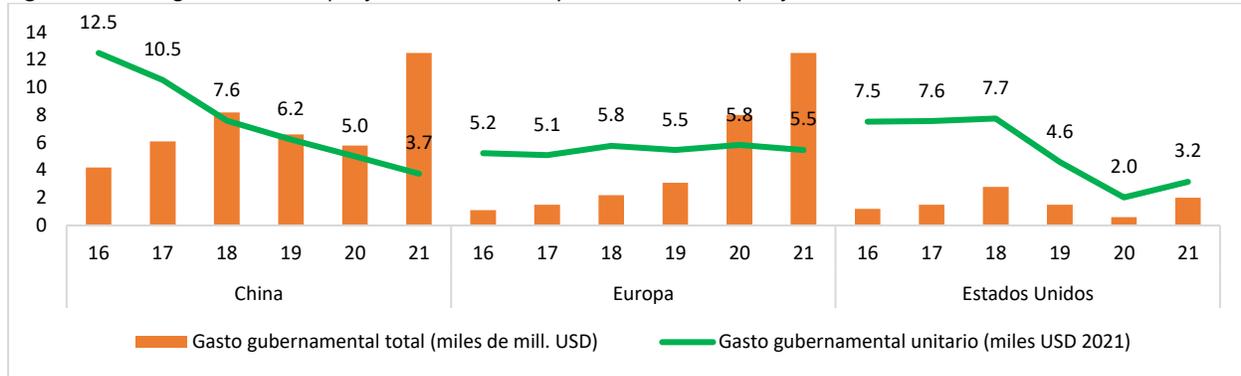
Figura 25: Gasto gubernamental y de consumidores en BEV y PHEV livianos de pasajeros



Nota: Gasto gubernamental es la suma de incentivos monetarios directos y recaudación no-percibida por exenciones tributarias. Fuente: IEA (2022a).

¹³ Esta caída se atribuye en parte a un declive en los subsidios por parte del gobierno chino y por otra parte a un rápido salto en las ventas, que prácticamente en el último año prácticamente se triplicaron desde 1.16 millones de unidades en 2020 a 3,33 millones en 2021.

Figura 26: Gasto gubernamental por jurisdicción en BEV y PHEV livianos de pasajeros



Nota: Gasto gubernamental es la suma de incentivos monetarios directos y recaudación no-percibida por exenciones tributarias. Fuente: IEA (2022a).

c. Comportamiento de la población

Las proyecciones de electromovilidad en general descansan en el supuesto de que no habrá cambios significativos en el comportamiento de los usuarios. Luego, los vehículos eléctricos sustituirán progresivamente a los de combustión interna sin cambios relevantes en las ventas totales de vehículos. Esto es equivalente a suponer que habrá una sustitución dentro de la categoría de vehículos, pero excluimos la posibilidad de que exista un reemplazo relevante por categorías de menor gasto energético agregado y consumo de cobre como medios de transporte público o alternativas urbanas en el campo de la micromovilidad, como *scooters* y bicicletas.

Sobre este punto, un estudio empírico reciente de Wang et al. (2022) encontró que los *scooters* eléctricos compartidos actuaban como un sustituto de los autos en niveles significativos, especialmente en centros urbanos de Estados Unidos, y que su uso variaba según las regulaciones, incentivos y tecnologías disponibles de cada ciudad. De igual forma, en un estudio sobre la factibilidad de reemplazo del automóvil por *scooters* eléctricos en base a las distancias de traslado, condiciones climáticas y otros factores realizado con datos de Alemania, Gebhardt, Wolf, & Seiffert (2021) estimaron que entre el 10% y el 15% del transporte motorizado podía ser cubierto por *scooters* eléctricos en dicho país.

Lo anterior pone en relieve la posibilidad de que exista un cambio de comportamiento poblacional en pro de la sustitución de los autos por otros medios menos intensivos en cobre, cambio que se vería influenciado al menos parcialmente por las regulaciones y condiciones geográficas de cada jurisdicción.

VI. Comentarios finales

Sobre la base de las políticas y planes a nivel global primariamente en base al escenario STEPS de la IEA, esperamos que la demanda incremental de cobre a partir de la transición energética crezca desde 1,2 Mt en 2020 a 2,8 Mt en 2025, 3,5 Mt en 2030 y 5,4 en 2040. La participación del uso de cobre en electromovilidad es el principal *driver* representando prácticamente la mitad del consumo hacia 2030 y 2040. Más aún, en el escenario potencial en que todas las ventas sean de vehículos eléctricos al 2040, la demanda incremental crecería hasta las 9,6 Mt y la participación de los autos eléctricos crecería al 71%.

Estos incrementos son significativos. Al 2040 equivaldría a cinco veces la producción de la mayor faena de cobre del mundo durante 2021, Minera Escondida, lo que también es alrededor de la totalidad de la producción anual de Chile en ese mismo año. En el escenario potencial en que la totalidad de las ventas de vehículos nuevos fuesen eléctricos al 2040, equivaldría al 27% de la producción de cobre refinada esperada de dicho año.

Dado que en general no se anticipa la materialización de proyectos suficientes a nivel global capaces de suplir estos incrementos de demanda, crece la expectativa de un desequilibrio de largo plazo donde la demanda supere a la oferta (Wood Mackenzie, 2022). De ocurrir, es de esperar que el precio del cobre se sitúe en niveles relativamente altos a la espera de la materialización de proyectos en el largo plazo.

Ahora bien, dada la relevancia de la electromovilidad en la expectativa agregada de crecimiento, cabe mencionar dos grandes riesgos que pueden ser especialmente incisivos en el mediano y largo plazo:

- Considerando que se trata de una industria aún inmadura, es altamente probable que, conforme aumente la innovación y aprendizaje tecnológico, los oferentes de cada industria busquen atenuar su consumo unitario de cobre y otras materias primas. Lo anterior es particularmente clave entre los fabricantes automotrices, donde yace el grueso de la demanda incremental y donde ya existe el precedente de sustitución parcial de cobre por aluminio realizada en vehículos de combustión interna en los '60s y '70s. Naturalmente, un mayor precio del cobre jugará como incentivo en esta dirección. En nuestro modelo de consumo de cobre asumimos una reducción en el consumo unitario de cobre respecto de 2020 de 30% al 2030 y 40% al 2040 para vehículos eléctricos de al menos cuatro ruedas. Sin embargo, actualmente no es claro prever la magnitud de estas variaciones.
- La robustez de las proyecciones descansa en gran parte en las expectativas de ventas de autos eléctricos subyacentes. Si bien estas son relativamente conservadoras en relación a las de otras agencias de mercado (véase, por ejemplo, BNEF (2022), S&P Global (2022), y los propios fabricantes automotrices (BNEF, 2021d)), a corto y mediano plazo la penetración puede ser menor a la esperada si, entre otros factores, los fabricantes no consiguen una paridad de precios entre vehículos eléctricos y convencionales. Igualmente, a largo plazo, pueden hacer cambios en el comportamiento de la población a partir de cual crezca el uso de alternativas de transporte público y micromovilidad en desmedro de los vehículos, lo cual naturalmente redundaría en un mejor consumo de cobre.

Con todo, a pesar de la incertidumbre, las expectativas del consumo de cobre a partir de la transición energética son altamente auspiciosas para la industria. Considerando que el éxito de Chile está inextricablemente asociado al desarrollo del cobre, esto presenta expectativas positivas para el desarrollo económico nacional en las siguientes décadas.

VII. Referencias

- Asian Metal. (2020, Mayo 9). Wah Wei Copper Foil starts mass production of 4.5µm high-end flexible copper foil. Retrieved from <https://www.asianmetal.com/news/data/1558036/9/Wah%20Wei%20Copper%20Foil%20starts%20mass%20production%20of%204.5%CE%BCm%20high-end%20flexible%20copper%20foil>
- Berahab, R. (2022, Mayo). The Energy Transition Amidst Global Uncertainties: A Focus on Critical Minerals. *Policy Brief*, 37, 1-12.
- BNEF. (2021a, Junio 25). The EV Price Gap Narrows. Retrieved from <https://about.bnef.com/blog/the-ev-price-gap-narrows/>
- BNEF. (2021b, Noviembre 30). Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. Retrieved from <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
- BNEF. (2021b, Noviembre 10). Electric Vehicle Sales Headed For Five And A Half Million In 2021 As Automakers Target 40 Million Per Year By 2030. Retrieved from <https://about.bnef.com/blog/electric-vehicle-sales-headed-for-five-and-a-half-million-in-2021-as-automakers-target-40-million-per-year-by-2030/>
- BNEF. (2021c, Noviembre 15). Global Energy Storage Market Set to Hit One Terawatt-Hour by 2030. Retrieved from <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030/>
- BNEF. (2021d, Noviembre 10). Electric Vehicle Sales Headed for Five and a Half Million in 2021 as Automakers Target 40 Million Per Year By 2030. Retrieved from <https://www.bloomberg.org/press/electric-vehicle-sales-headed-for-five-and-a-half-million-in-2021-as-automakers-target-40-million-per-year-by-2030/>
- BNEF. (2022, Junio 1). EV Sales Will Triple by 2025 and Still Need More Oomph to Reach Net Zero. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-06-01/will-electric-cars-take-over-they-must-sell-faster-to-reach-net-zero>
- CDA. (2017). Copper Drives Electric Vehicles. Retrieved from https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/A6191-ElectricVehicles-Factsheet.pdf
- Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., . . . Chen, Q. (2020). Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. *Trans. Tianjin University*, 26, 208-217. doi:<https://doi.org/10.1007/s12209-020-00236-w>
- Cherry, C., Weinert, J., Xinmiao, Y., & Gelder, E. V. (2009). *Electric bikes in the People's Republic of China*. Retrieved from <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/27537/electric-bikes.pdf>
- Citi Research. (2021, Octubre 7). Copper Book: 2021-2030 Outlook. 76. Retrieved from https://www.orocoresourcecorp.com/_resources/blog/print-20211018.pdf
- Cochilco. (2020). Posibles sustitutos del cobre. Retrieved from <https://cdn.netmin.cl/minex/27bc9397-9561-4ce0-9c2c-e8adcf6f29e6/0d76b501-6314-4be2-9bcc-790351ef06bd.pdf>
- Cohen, A. (2022). Challenges to Electric Vehicle Adoption. *Mineta Transportation Institute*. Retrieved from transweb.sjsu.edu/research/2215
- Cohen, R., Eames, P. C., Hammond, G. P., Newborough, M., Norton, B., & . (2022, Marzo). Briefing: The 2021 Glasgow Climate Pact – steps on the transition pathway towards a low carbon world. *Proceedings of the ICE - Energy*. doi:10.1680/jener.22.00011
- Cole, W., Frazier, A. W., & Augustine, C. (2021, Junio). *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update*. Technical Report NREL/TP-6A20-79236, National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf>
- DBS Asian Insights. (2018, Octubre). Copper And Its Electrifying Future. *Sector Briefing 61*. Retrieved from https://www.dbs.com.sg/treasures-private-client/aics/pdfController.page?pdfpath=/content/article/pdf/AIO/102018/181008_insights_copper_SparX.pdf
- Deloitte. (2020). *Discover the future: 2020 predictions for UK Technology, Media and Telecommunications*. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-technology-media-telecommunications-predictions-2020.pdf>

- Diario Financiero. (2022, Julio 13). U. de Concepción y Atacama Copper Foils buscan producir láminas de cobre con valor agregado y sustentable. Retrieved from <https://www.df.cl/df-lab/sostenibilidad/u-de-concepcion-y-atacama-copper-foils-buscan-producir-laminas-de-cobre>
- EIA. (2022, Marzo 25). Duration Of Utility-Scale Batteries Depends On How They're Used. Retrieved from <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=51798>
- Electric Vehicle Database. (2022, Junio 29). *EV Database*. Retrieved from <https://ev-database.org/>
- Elshkaki, A., Graedel, T. E., Ciacci, L., & Reck, B. K. (2016, Julio). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, 39, 305-315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006>
- FMI. (2022, Agosto 4). External Sector Report. Retrieved from <https://www.imf.org/en/Publications/ESR/Issues/2022/08/04/2022-external-sector-report>
- Freewire. (2020, Julio 1). What's the Difference Between EV Charging Levels? Retrieved from <https://freewiretech.com/difference-between-ev-charging-levels/#:~:text=Summary%3A%20DCFCs%20are%20the%20fastest,of%20range%20in%2015%20minutes.>
- Gaton, B. (2018). BEV, PHEV, HEV or FCEV: Choose your EV acronym! (JSTOR, Ed.) *ReNew: Technology for a Sustainable Future*, 145, 80-83. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/90025501>
- Gebhardt, L., Wolf, C., & Seiffert, R. (2021). "I'll Take the E-Scooter Instead of My Car" —The Potential of E-Scooters as a Substitute for Car Trips in Germany. *Sustainability*, 13. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/>
- Goldman Sachs Research. (2021, Abril 13). Green Metals - Copper is the new oil. Retrieved from <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/copper-is-the-new-oil/report.pdf>
- Gong, H., Wang, M. Q., & Wang, H. (2013). New energy vehicles in China: policies, demonstration, and progress. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18, 207–228. doi:<https://doi.org/10.1007/s11027-012-9358-6>
- Henckens, M., & Worrell, E. (2020, Agosto). Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. 264, 1-12. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>
- Henckens, M., & Worrell, E. (2020). Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. *Journal of Cleaner Production*, 264, 1-12. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>
- ICA. (2017, Abril). Copper intensity in the electrification of transport and the integration of energy storage. Retrieved from <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/05/2017.04-E-Mobility-Factsheet-4.pdf>
- IEA. (2021). Energy Storage. París. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-storage>
- IEA. (2021a). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. International Energy Agency, París. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA. (2021b). Solar PV. París. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- IEA. (2021c). Wind Power. París. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/wind-power>
- IEA. (2021d, Noviembre). Electric Vehicles - Tracking Report. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- IEA. (2021d, Octubre). World Energy Outlook 2021. París, Francia. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>
- IEA. (2021e, Noviembre). Annual battery storage capacity additions in the Sustainable Development Scenario, 2020-2040. París. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-battery-storage-capacity-additions-in-the-sustainable-development-scenario-2020-2040>
- IEA. (2022a, Mayo). Global EV Outlook 2022. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- IEA. (2022b, May 23). *Global EV Data Explorer 2022*. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-ev-outlook-2022>
- ING. (2021, Octubre 13). Electric vehicles to drive metals demand higher. Retrieved from <https://think.ing.com/articles/electric-vehicles-to-drive-metals-demand-higher/>
- IRENA. (2022, Abril 11). Renewable Capacity Statistics 2022. Retrieved from <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2022/Apr/Renewables-Take-Lions-Share-of-Global-Power-Additions-in-2021>
- Jiao, N. (2019, Mayo 29). Copper Demand in Energy Storage. In A. C. Council (Ed.). Seattle.

- Kurani, K. S., Caperello, N., & TyreeHageman, J. (2016). New Car Buyers' Valuation of Zero-Emission Vehicles: California. *UC Davis: Plug-In Hybrid & Electric Vehicle Research Center*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/28v320rq>
- Levitt, T. (1965, Noviembre 1). Exploit the Product Life Cycle. *Harvard Business Review*, 43, 81-94. Retrieved from <https://hbr.org/1965/11/exploit-the-product-life-cycle>
- Macquarie Research. (2019, Diciembre 5). *Korea EV battery materials - Bullish on EV battery copper foil*.
- Månberger, A., & Stenqvist, B. (2018, Agosto). Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy*, 119, 226-241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>
- Ministerio de Energía. (2022, Enero 1). Estrategia Nacional de Electromovilidad. Santiago de Chile. Retrieved from <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3773>
- Morris, J. (2021, Noviembre 13). Electricity Grids Can Handle Electric Vehicles Easily – They Just Need Proper Management. *Forbes*. Retrieved Abril 20, 2022, from <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2021/11/13/electricity-grids-can-handle-electric-vehicles-easily--they-just-need-proper-management/?sh=20f8abfa7862>
- Naciones Unidas. (2022, Junio). The Energy Progress Report 2022. *Tracking SDG7*. Retrieved from https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2022-full_report.pdf
- Precedence Research. (2022). *E-bike Market Size, Trends, Growth, Report 2022-2030*. Retrieved from <https://www.precedenceresearch.com/e-bike-market>
- Reuters. (2021, Agosto 5). Biden seeks to make half of new U.S. auto fleet electric by 2030. Retrieved from <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/biden-set-target-50-evs-by-2030-industry-backs-goal-2021-08-05/>
- Rodríguez-Zúñiga, M., Víctor-Gallardo, L., Quirós-Tortós, J., Jaramillo, M., Vogt-Schilb, A., & . (2021). manejarlo, Impacto fiscal de la descarbonización del transporte en Costa Rica y opciones de política para manejarlo.
- S&P Global. (2022, Febrero 16). Global light duty EV sales to rise to 26.8 mil by 2030: Platts Analytics. Retrieved from <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/021622-global-light-duty-ev-sales-to-rise-to-268-mil-by-2030-platts-analytics>
- Seck, G. S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M., & Carcanague, S. (2020, Diciembre). Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between lowcarbon energy transition and supply limitations. *Resources, Conservation & Recycling*, 163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105072>
- Tesla. (2022, Mayo 6). Impact Report 2021. Retrieved from https://www.tesla.com/ns_videos/2021-tesla-impact-report.pdf
- U.S. Department of Energy. (2019, Julio). Solving Challenges in Energy Storage. Washington, DC. Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f64/2018-OTT-Energy-Storage-Spotlight.pdf>
- Wang, K., Qian, X., Fitch, D. T., Lee, Y., Malik, J., & Circella, G. (2022). What travel modes do shared e-scooters displace? A review of recent research findings. *Transport Reviews*. doi:10.1080/01441647.2021.2015639
- WEF. (2020, Noviembre 11). <https://www.weforum.org/agenda/2020/11/china-bans-fossil-fuel-vehicles-electric/>. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2020/11/china-bans-fossil-fuel-vehicles-electric/>
- Wood Mackenzie. (2022, Junio 24). Global copper strategic planning outlook - Q2 2022. *Commodity Market Report*.
- Wood Mackenzie. (2022, Junio). Global copper strategic planning outlook Q2 2022.

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

Andrés González Eyzaguirre

Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Julio / 2022