



Matriz energética eléctrica del país

Consideraciones sobre su suficiencia

Autores

Rafael Torres M.
Email: rtorres@bcn.cl

Nicolás García B.
ngarcia@bcn.cl

Tel.: (56) 32 226 3912

Comisión

Elaborado para Comisión de
Medioambiente de la Cámara
de Diputados.

Nº SUP: 132210

Documentos disponibles en:
<https://atp.bcn.cl>

Resumen

El compromiso adquirido por Chile en la COP 21, el denominado Acuerdo de París, lo obliga a cumplir ciertas metas relacionadas con el Cambio Climático (CC), que se traducen en la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Para ello, las autoridades nacionales han propuesto metas de cumplimiento que apuntan, principalmente, al reducir el uso de energías proveniente de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), tanto en la maquinaria productiva como para satisfacer las necesidades diarias de la ciudadanía. Así, siendo la electricidad un energético ubicuo e indispensable, una fracción sustantiva de las metas está dirigida a este sector. Una señal de los esfuerzos por reducir la producción de GEI ha sido la multiplicación de inversiones en Energías Renovables no Convencionales. Pero dado el carácter inestable y poco predecible de aquellas, aún dentro de ciclos naturales establecidos, y las tecnologías de colección, transducción, sincronización transmisión, distribución y uso necesarias para hacer un uso económicamente razonable, imponen barreras difíciles de superar. A pesar de ello, se han desarrollado tecnologías que han llevado la producción de electricidad basada en ERNC's a una condición competitiva con las energías tradicionales, particularmente con los combustibles fósiles, además de proporcionar un buen reemplazante de la energía hídrica, en drástica reducción debido al Cambio Climático.

Los éxitos alcanzados por nuestro país y la riqueza natural de la que está dotado, han logrado aminorar el uso de combustibles fósiles, adelantando incluso la fecha de cierre de algunas generadoras a carbón. El impulso legislativo ha llevado a plantear drásticas medidas para cuatro años más, pero dado que de acuerdo al análisis presentado en País Circular¹ estamos al límite operativo de las instalaciones de transmisión de energía y se necesita urgentemente que nuevas obras, detenidas o retrasadas por las necesidades de hacer cambios que aumenten la capacidad de transmisión sin contravenir las normas ambientales que, entre otros requerimientos, necesitan la aprobación de la ciudadanía que puebla los extensos territorios que las líneas de transmisión requieren cruzar.

Además es necesario hacer “conversar” las distintas tecnologías utilizadas para distintos tipos de recursos naturales y si esos no fueran obstáculos suficientes, la impredecibilidad de condiciones climáticas locales y los ciclos diarios de los recursos utilizados hacen necesarias tecnologías de acopio de energía que aún están por desarrollar o alcanzar

¹ País Circular. “Transmisión eléctrica: clave para aprovechar el auge de la generación limpia, requiere de urgente inversión en infraestructura para evitar la pérdida de energía”. Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/industria/transmision-electrica-clave-para-aprovechar-el-auge-de-la-generacion-limpia-requiere-de-urgente-inversion-en-infraestructura-para-evitar-la-perdida-de-energia/> (Diciembre 2021).

una cierta madurez. Es así, por lo tanto, que no es posible dar respuestas categóricas a las muchas interrogantes que surgen desde el mundo parlamentario, aunque sí es posible entregar un cuerpo estructurado de antecedentes, desde distintos ámbitos y distintas organizaciones nacionales e internacionales, que pueden brindar los insumos para proyectar acciones y políticas que permitan satisfacer tanto nuestros compromisos internacionales, como las necesidades para el desarrollo sustentable de nuestro país.

Nota Previa

En la literatura disponible, las unidades utilizadas para el análisis del sector eléctrico son Watts (W) y Watts-hora (Wh) que suelen causar confusión al lector no especialista. En su beneficio, se incluye la siguiente nota explicativa.

La Física define la **Energía** como “*la capacidad de realizar trabajo*”, en tanto que la **Potencia** es definida como “*el trabajo realizado en un tiempo determinado*”. Es decir, se dice que un sistema **A** tiene más potencia que un sistema **B**, si el sistema **A** puede hacer **más** trabajo que el **B** en el **mismo tiempo**.

Así, una generadora con una potencia de **100 MW** puede entregar 2 veces más energía (para realizar el doble de trabajo) que una generadora de **50 MW en un período de tiempo determinado**. Es decir, si el tiempo considerado es una hora, la energía traspasada será **100 MWh contra 50 MWh**.

Por supuesto, no basta con disponer de mucha potencia eléctrica de generación, la electricidad generada debe llegar a su lugar de destino para poder realizar trabajo.

La relación algebraica entre **Potencia y Energía** es muy simple:

Energía se representa por la letra **E**, **Potencia** por la letra **P** y tiempo por la letra **t**. La relación es:

$P = \frac{E}{t}$ (Ec.1), además -según la misma expresión- $E = P \times t$ (Ec.2); es decir, **la energía (o trabajo realizado)** se puede expresar en Watts-hora (**Wh**).

Por tanto: la **Potencia** -que se expresa en **Watts**- es el cociente entre el trabajo (la energía que se debe invertir para realizar una cierta tarea) y el tiempo necesario para realizarlo (Ec.1).

Ejemplo: se quiere fundir un número determinado (N_d) de toneladas de mineral de cobre diariamente, y cada tonelada requiere una energía de fusión E_f . De aquí, sigue que la energía total diaria (E_{td}) necesaria será:

$$E_{td} = N_d \times E_f$$

Y para ello será necesario contar con una generadora con una **Potencia** mínima

$$P = \frac{N_d \times E_f}{24_{hr}}$$

I. Introducción

La Comisión de Medioambiente de la Cámara de Diputados ha solicitado un informe sobre cuatro temas, que son: (a) ¿Cuál es disponibilidad de capacidad de energía renovable por parte de las empresas eléctricas? (b) Producto de la crisis hídrica en el país, ¿es necesaria la reactivación de las termoeléctricas generadoras a carbón y a combustión de fósiles, de acuerdo con los estudios técnico-científicos que actualmente existen? (c) ¿Cuántas toneladas (de CO₂) emiten dichas empresas actuando al 100%? y finalmente (d) ¿La capacidad instalada, sin la presencia de generadoras energizadas por combustibles fósiles, puede solventar el consumo eléctrico de Chile?

Durante su elaboración, se han consultado fuentes nacionales y extranjeras, para proporcionar una visión amplia y objetiva sobre el estatus de las condiciones objetivas de la matriz energética del país y el estado del arte de las tecnologías de almacenamiento de energía que harían posible el reemplazo de las generadoras basadas en combustibles fósiles por fuentes basadas en Energías Renovables No Convencionales (ERNC) hacia el año 2030.

Las traducciones son de los autores.

II. Contexto

El mundo ha entrado en un proceso de transición global del ordenamiento de la biósfera que ha sido caracterizado como una “crisis climática”, cuya manifestación más evidente es el aumento de la temperatura media global. Los modelos climáticos desarrollados han permitido afirmar que, si la temperatura media global aumenta más de 1,5°C sobre su promedio pre-industrial. El IPCC señala, “El calentamiento causado por las emisiones antropógenas desde el período preindustrial hasta la actualidad durará de siglos a milenios y seguirá causando nuevos cambios a largo plazo en el sistema climático, como un aumento del nivel del mar, acompañados de impactos asociados”².

Cumpliendo con el compromiso que Chile asumió durante la COP21³ el año 2015, conocido como “Acuerdo de París”, de realizar acciones para alcanzar la neutralidad de emisiones de GEI⁴ hacia el año 2050, el sector energía de nuestro país -responsable de la emisión del 77,4% de las emisiones totales de GEI del año 2018- ha publicado la actualización de su contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) destacando la meta de alcanzar la neutralidad de emisiones de GEI para 2050 (es decir, reducir a cero las emisiones netas de dichos gases)⁵.

² IPCC. Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) “Calentamiento global de 1,5°C” (2019). Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf. (Diciembre 2021).

³ Conferencia de las Partes del año 2015.

⁴ Los gases de efecto invernadero (GEI) atrapan la energía, calentando la superficie del planeta. Algunos de ellos son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃).

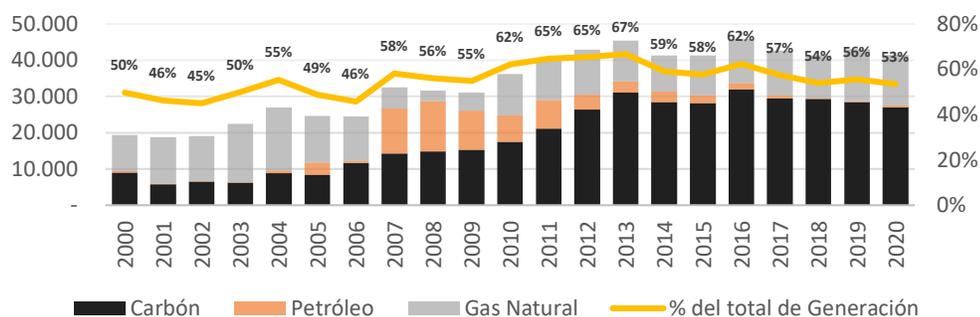
⁵ *Ibidem*

Se puede sostener que, dada la composición de la matriz energética del país, es el sector energía el que concentra las mayores oportunidades para dar cumplimiento a las metas comprometidas por Chile en el Acuerdo de París, tal como el retiro gradual de las centrales a carbón, reduciendo las emisiones del sector energía, permitiendo una mayor penetración de las energías renovables, que -a su vez- habilitan otras acciones intensivas en electrificación, que en conjunto, permitirían cumplir con el objetivo de carbono-neutralidad.

III. Energías convencionales

En términos históricos, entre los años 1996 y 2020 la generación eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se basó en carbón, gas natural y fuentes hídricas, según se aprecia en el (Gráfico 1)⁶. Así, la generación de electricidad en base a combustibles fósiles ha tenido una participación que históricamente ha oscilado entre el 45% y 67% del total, siendo las centrales a carbón las que producen el mayor aporte, seguidas por las centrales a gas natural y -en menor proporción- las petroleras.

Gráfico 1. Generación de electricidad basada en combustibles fósiles [GWh], 2000 – 2020



Fuente: Elaboración propia en base a cifras del Coordinador Eléctrico Nacional (2021).

IV. Energías renovables no convencionales (ERNC)

Según lo destaca el Ministerio Energía (2020), el retiro de centrales a carbón es la medida de mayor impacto en la reducción de emisiones, permitiendo una mayor penetración de las energías renovables, reduciendo las emisiones del sector energía, lo que, a su vez, habilita otras acciones intensivas en electrificación, tales como la electromovilidad, electrificación de usos motrices en industria y minería, calefacción eléctrica, y el uso de hidrógeno.

Según el citado ministerio, la matriz energética primaria -entendida como “la combinación de diversas fuentes primarias de energía utilizadas para satisfacer las necesidades energéticas de una región”⁷-

⁶ Lo anterior sigue siendo así, pese a que, a partir del año 2012 se evidencia un aumento significativo en la generación basada en energías eólica, solar y biomasa.

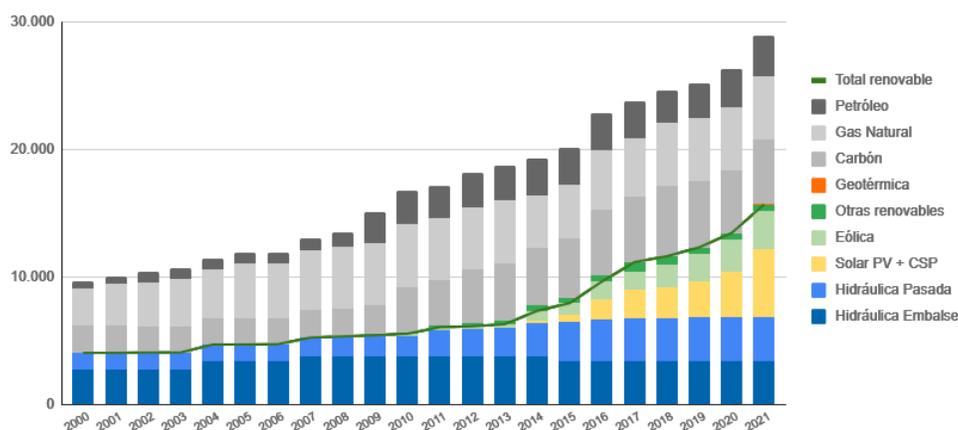
⁷ Fundación Konrad Adenauer. (2021). “Energy Matrix: Implications and advances in Latin America and the Caribbean”. Disponible en: <http://bcn.cl/2udb0>. (Diciembre 2021).

alcanzaba las 345.647 Teracalorías (Tcal)⁸. Los recursos fósiles concentran la mayor parte, representando el 68% del total, que corresponde a la suma del petróleo crudo (30%), carbón mineral (22%) y gas natural (16%). Luego, con menor participación destaca la energía primaria proveniente de la biomasa (23%), seguida por aquellas de origen hídrico (5%), solar (2%) y eólico (1%)⁹.

Por otra parte, el consumo final de energía¹⁰ en Chile alcanzó 301.629 Tcal en 2019, siendo los derivados del petróleo y la electricidad los principales componentes, al concentrar el 58% y 22% respectivamente. La matriz eléctrica tiene al carbón como su fuente primaria con un 41% del total, seguido por la biomasa (26%), el gas natural (15%), energía hídrica (11%) y la energía eólica y solar, ambos con un 3% (Energía Abierta, 2021).

En julio de 2021 el SEN, (fusión de los previos SIC y SING) contaba con una **potencia instalada** de generación equivalente a 28.495 MW. Según el Ministerio de Energía (2021), del total de la capacidad instalada, el 53,3% corresponde a recursos renovables, es decir, de origen hidroeléctrico (hidro-embalse e hidro-pasada, con un 11,9% y 12,1% respectivamente), solar fotovoltaica (17,8%), eólico (9,9%), biomasa¹¹ (1,5%) y geotermia (0,2%). Mientras que el 46,7% restante corresponde a centrales termoeléctricas a carbón (17,8%), gas natural (17,6%), o derivados del petróleo (11,3%). Situación representada en el Gráfico 2.

Gráfico 2. Capacidad instalada por fuente [MW], julio 2021



Fuente: Generadoras de Chile. "Generación eléctrica en Chile"¹².

⁸ Teracalorías = 10^{12} calorías (un millón de millones de calorías). La caloría es unidad de energía (trabajo) y su equivalencia es: 1 Joule = 0,24 cal.

⁹ Ministerio de Energía, (2021). "Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027". Disponible en <http://bcn.cl/2udb2>. (Diciembre 2021).

¹⁰ Energía destinada a los sectores consumidores de la economía nacional, tanto para uso energético como no energético.

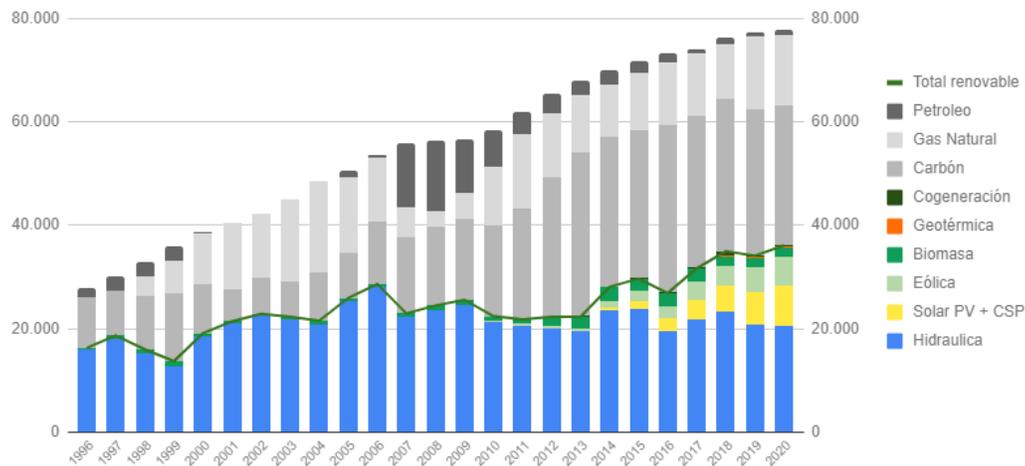
¹¹ La biomasa es un recurso térmico, pues se combustiona para generar electricidad, sin embargo, se incluye entre las ERNC porque se supone que el CO₂ que produce durante su combustión es el mismo que absorbió durante su crecimiento, siendo por tanto carbono-neutral. N. del A.

¹² Generadoras de Chile. "Generación eléctrica en Chile". Disponible en: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>. Diciembre 2021.

Se observa en este gráfico que los aportes **en potencia** de las fuentes convencionales permanecen casi invariables, y que la notable subida en capacidad de producción (potencia) se debe casi exclusivamente a las fuentes ERNC, que irrumpen con fuerza a partir del año 2013, representando en el año en curso el 29,4% de la capacidad instalada.

Por otra parte, el SEN -al mes de julio de 2021- **generó** 47.127 GWh¹³, de los que 19.383 GWh (41%) correspondieron a Energías Renovables No Convencionales (ERNC) es decir, en base a generación minihidráulica de pasada, solar fotovoltaica, eólica y biomasa. Luego, la producción acumulada ha sido principalmente térmica concentrando un 59% del total, correspondiente a la suma del carbón (38%), gas (18%) y derivados del petróleo (3%). Cómo se indicó, el restante 41% corresponde a generación bruta de origen renovable: Hídrico (19%), biomasa (3%), eólico (7%) y solar (11%). Situación representada en el Gráfico 3 a continuación. Es decir, el aporte de las ERNC alcanzó un 21% de la generación total.

Gráfico 3. Volumen de Energía generada por fuente [GWh]



Fuente: Generadoras de Chile. "Generación eléctrica en Chile"¹⁴.

Cabe preguntarse ¿por qué, si la capacidad ERNC instalada corresponde al 29,4% de la **capacidad total**, la energía de ella derivada alcanza sólo un 21% del **total generado**? La respuesta en sección siguiente.

V. Integración de sistemas ERNC de generación eléctrica al SNE

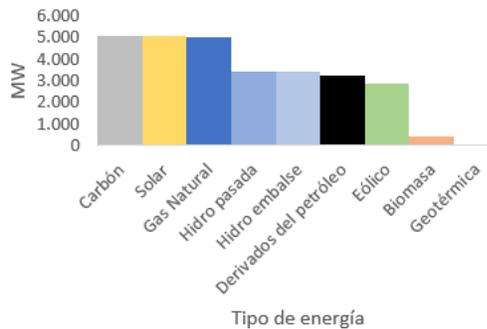
La pregunta con que termina la sección anterior tiene una respuesta de implementación compleja. Frente a la pregunta ¿La capacidad instalada, sin la presencia de generadoras energizadas por combustibles fósiles, puede solventar el consumo eléctrico de Chile? La respuesta está en el Gráfico 4, que se analiza a continuación.

¹³ GWh = Giga Watt hora. 10⁹ (mil millones) de Watts. El watt es unidad de potencia y el Watt hora es unidad de energía.

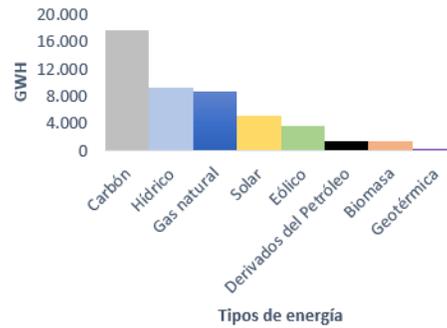
¹⁴ *Ibidem*

Gráfico 4. Capacidad instalada [MW] y Generación Bruta [GWh] según tipo de fuente, julio 2021

(a) Capacidad instalada [MW] en Chile según tipo de energía, al mes de julio de 2021.



(b) Generación bruta SEN por fuente de generación acumulada al mes de julio 2021.



■ Carbón ■ Solar ■ Gas Natural ■ Hidro pasada ■ Hidro embalse ■ Derivados del petróleo ■ Eólico ■ Biomasa ■ Geotérmica

Fuente: Elaboración propia en base a cifras del Ministerio de Energía (2021)

En primer lugar, se observa que la capacidad instalada (en Watts) no se refleja proporcionalmente en la generación bruta (en Watts-hora), es decir, la cantidad de energía que se extrae de cada fuente disponible (generación bruta por tecnología) no refleja proporcionalmente la capacidad instalada. El ejemplo más dramático es el de la energía solar, que -teniendo prácticamente la misma capacidad instalada que la basada en carbón (gráfico de la izquierda) y gas natural, ambos combustibles fósiles- aporta aproximadamente 5000 MW de potencia, y sólo alrededor de 4000 MWh de energía, mientras que la basada en carbón prácticamente la cuadruplica, en tanto que la basada en gas natural licuado casi la duplica. Algo similar ocurre con la energía eólica ¿Cómo se explica esta asimetría?

La respuesta es que la energía proveniente de combustibles fósiles sufre menos procesos de transducción (conversión de un tipo de señal en otro. En el caso de la energía, es un tipo de energía en otro)¹⁵. En el caso de los combustibles fósiles, la energía almacenada en los enlaces químicos del carbono con otros átomos, se transduce en calor a través de la combustión, aquél eleva la temperatura del agua hasta convertirla en vapor a alta presión, que posteriormente se transduce en energía cinética en el movimiento de las aspas de una turbina, que experimenta una transducción final en voltaje alterno, que puede generar una corriente eléctrica. Una característica de las generadoras energizadas con fuentes fósiles, es que pueden ser activadas y utilizadas en días y horas previsible, susceptibles así de programación anticipada y, en caso de emergencia, pueden ser puestas en servicio rápidamente -como las generadoras Diesel y gas- o mantenerse activadas, listas para entrar en servicio, como las generadoras a carbón.

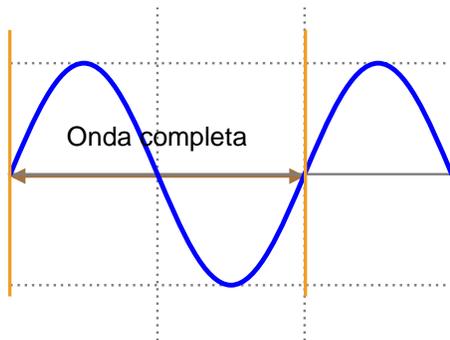
Las generadoras basadas en fuentes ERNC, por su parte -como solar y eólica, a diferencia de las basadas en combustibles fósiles- experimentan variaciones y son susceptibles de afectación por condiciones aleatorias (meteorológicas, principalmente), que dificultan la planificación y la respuesta rápida a imprevistos. Las solares, para comenzar, dependen de la irradiación solar, que varía constantemente y además depende -de manera muy estricta- de condiciones meteorológicas locales,

¹⁵ Transducción: conversión de un tipo de señal en otro (RAE). En el caso de la energía, es un tipo de energía en otro.

no siempre predecibles por los modelos meteorológicos, que -por lo demás- no son confiables para áreas restringidas.

Las generadoras eólicas por su parte, dependen de condiciones geográficas más amplias que las de una cierta región, dado que las corrientes de aire atmosféricas de un hemisferio son mucho menos predecibles que la radiación solar. Por otra parte, la red eléctrica doméstica -en nuestro país- entrega electricidad en la forma de voltaje alterno con una frecuencia de 50 ciclos por segundo (50Hz), es decir, en un segundo se producen 50 ondas sinusoidales completas y cada onda completa dura 20 mseg (milisegundos)". La Figura 1, ilustra una onda sinusoidal completa¹⁶.

Figura 1.- Onda sinusoidal completa



Fuente: "Simple sine wave".

Distintas generadoras vierten su producción al sistema de transmisión, que conduce dicha energía hasta sus puntos de destino. Y -obviamente- todas deben verter su energía sincrónicamente, es decir, alcanzar sus máximos y sus mínimos al mismo tiempo, concertadamente. Si se pierde la sincronía, las ondas provenientes de distintas fuentes interferirán y se perderá energía. Se necesitan, por tanto, sistemas automáticos de alta precisión para evitar inyecciones asincrónicas a las líneas transmisión y -aguas abajo- a las líneas de distribución.

Con sistemas electromecánicos movidos por motores dependientes de energías fósiles, o energía hidráulica de pasada o represas, con turbinas conectadas a dichos dispositivos, su velocidad de rotación se ajusta con sistemas de control de velocidad similares a los de un vehículo a vapor, petróleo o gasolina y la sincronía entre los participantes es relativamente fácil de lograr con sistemas electromecánicos automáticos. No así con fuentes de energía de frecuencia aleatoria, como la solar, la eólica y la undimotriz (energía eléctrica derivada del movimiento de las olas).

Dichas fuentes de energía presentan serios desafíos. En primer lugar, la energía solar se produce en miríadas de paneles solares, todos con ligeras diferencias de producción entre ellos, y con su intensidad de producción variando continuamente, según la hora del día, y/o la estación del año, y/o el estado de cada panel solar. Además su producción no es un voltaje sinusoidal de frecuencia constante, invirtiendo su polaridad 50 veces por segundo, sino de polaridad constante.

¹⁶ "Simple Sine Wave" en: <http://bcn.cl/2udcu>. Diciembre 2021.

El sistema se complejiza. Es necesario aunar todos flujos de energía provenientes de cada panel, y convertirlo en una corriente alterna de frecuencia y amplitud (voltaje máximo de la sinusoide) constantes, susceptible de ajustes en frecuencia, para mantener la fase (todos para arriba, todos para abajo, al mismo tiempo) con los otros participantes que vierten en las mismas líneas de transmisión.

La generación eólica -a diferencia de la generación solar- es alterna. Pero la frecuencia para cada torre de aspas no es necesariamente la misma, por tanto hay que convertirla en corriente continua (rectificar), aunar todas las fuentes y luego, al igual que con la energía solar, convertir la corriente continua en corriente alterna de 50 Hz.

Como nota pertinente, los problemas asociados a la producción de sistemas undimotrices es muy similar a la de los sistemas eólicos.

Finalmente es necesario mantener la sincronía de todos los aportes que llegan a los usuarios en un único voltaje alterno de 220 Volts amplitud y 50 Hz de frecuencia.

Todo lo anterior, sin contar con la necesidad urgente de integrar sistemas de acumulación de energía para no depender de combustibles fósiles cuando las generadoras ERNC caigan en períodos de baja producción, connaturales a las diferentes tecnologías. Baja irradiación solar para paneles solares; escasez de vientos para la generación eólica; sequía para la generación hidráulica; y mar calmo para la generación undimotriz.

Por último, para Verdejo (2021) es necesario señalar que estando saturada la línea de transmisión Cardones-Polpaico¹⁷, urge la entrada en operación de la futura línea de transmisión Kimal-Lo Aguirre, proyecto cuya aprobación ambiental y territorial, el autor, augura compleja¹⁸. Y si, la autoridad no aprueba los proyectos para repotenciar la principal línea de transmisión existente, continuarán los vertimientos de energía de las generadoras ERNC¹⁹, debido a que la inflexibilidad del gas natural y la carencia de suficiente capacidad de transmisión las obliga a ello.

Se infiere entonces, que la integración de los sistemas de generación de electricidad deberá superar una serie de desafíos para hacerse, al fin, realidad. Y que no basta con tener la posibilidad de generar mucha energía con distintas tecnologías, sino que es también necesario desarrollar tecnologías robustas y resilientes para enfrentar los desafíos que cada tecnología impone, así como construir las carreteras eléctricas para el transporte de energía a cada rincón de la extensa y desafiante geografía de nuestro país.

¹⁷ Prof. Humberto Verdejo. Comisión de Minería y Energía del Senado. Disponible en: <https://tv.senado.cl/tvsenado/comisiones/permanentes/mineria-y-energia/comision-de-mineria-energia/2021-11-03/071002.html>. (Diciembre 2021).

¹⁸ *Ibidem*.

¹⁹ País Circular. "Transmisión eléctrica: expertos analizan los desafíos que enfrenta la construcción de una infraestructura clave para el proceso de descarbonización". Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/industria/transmision-electrica-expertos-analizan-los-desafios-que-enfrenta-la-construccion-de-una-infraestructura-clave-para-el-proceso-de-descarbonizacion/>. (Diciembre 2021).

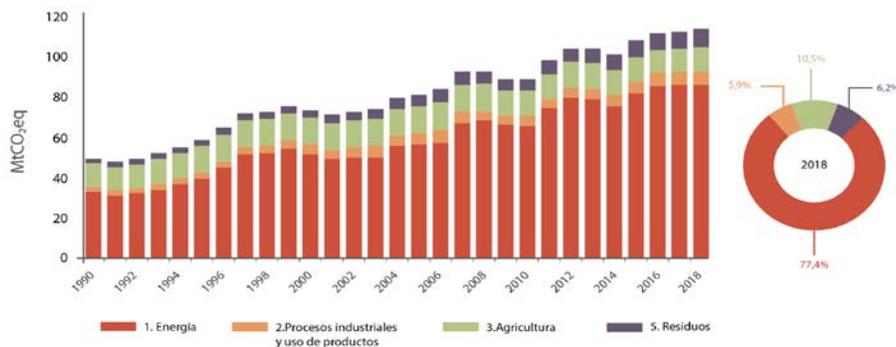
En suma, la disponibilidad de energías ERNC actual -por razones de cantidad, tecnología y transportes- es insuficiente para garantizar el abastecimiento de electricidad para todo el país, permitiendo sostener que son necesarios los aportes de las generadoras energizadas por combustibles fósiles en un horizonte probablemente mayor que cinco años.

No obstante, considerando que el mix de generación actual ha sido capaz de proveer la energía suficiente para el país, y que aún hay generadoras a carbón de respaldo para emergencias, no parece necesaria la reactivación de aquellas que han sido cerradas.

VI. Emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía

Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de 2018²⁰, las emisiones vinculadas al sector de Energía -que incluyen la generación de electricidad, uso de energía en los edificios y uso de energía en el transporte- alcanzaron 86,954 ktCO₂eq (MMA, 2021), de las cuales un 77,4% provino de la quema de combustibles para la generación de energía eléctrica (MMA, 2018), situación expresada por el Gráfico N° 5, a continuación.

Gráfico 5. Emisión sectorial de GEI



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).

Nota: Se omiten las capturas del sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.

Las emisiones del sector energético se componen según: generación de electricidad, 32%; transporte, 24%; industrias manufactureras y construcción 14%; y resto de los subsectores, 7% (Ministerio de Energía, 2020). El 25% de las emisiones del subsector de generación eléctrica corresponden a la generación en base a carbón (Ministerio de Energía, 2020).

VII. Retiro de centrales a carbón

Considerando la relevancia técnica y política que tiene el retiro de centrales en el cumplimiento de la meta de carbono neutralidad al año 2050, se presentan las características y fundamentos del acuerdo de retiro de centrales a carbón al año 2040 y -posteriormente- se da cuenta de escenarios de retiro

²⁰ Ministerio del Medio Ambiente Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). Disponible en: <https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/Informe-Inventarios-Regionales-serie-1990-2018.pdf>. (Diciembre 2021).

anticipado de las centrales, en el marco del informe preliminar de la Planificación Energética de Largo Plazo 2023–2027 del Ministerio de Energía (2021).

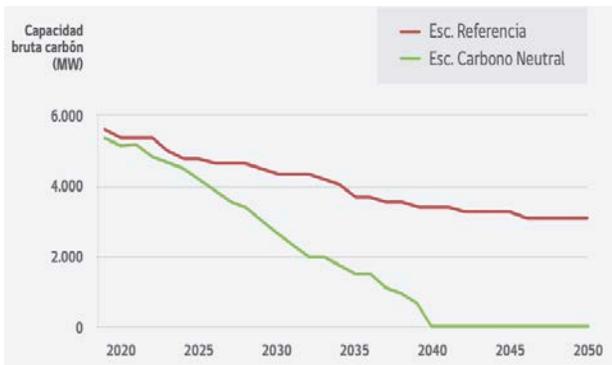
a. Acuerdo de retiro de centrales a carbón al año 2040

El mes de junio del año 2019 se selló el Acuerdo de Retiro de Carbón²¹, de origen voluntario y carácter vinculante, sostenido entre el Gobierno de Chile y las empresas propietarias de centrales a carbón. En aquél se estableció un retiro programado al 2040, con una primera fase de retiro al 2024 (31% de la capacidad total), y logro de la meta de carbono neutralidad al año 2050.

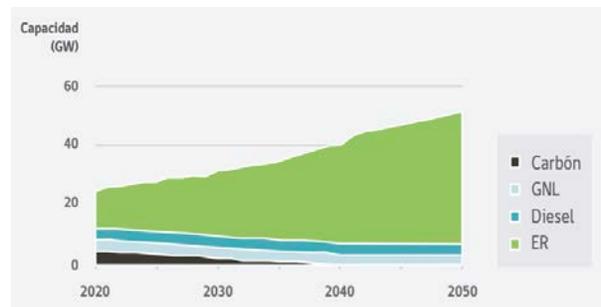
En el acuerdo gestado el 2019, para el escenario de carbono neutralidad, el Ministerio de Energía (2019) simuló el retiro de la totalidad de las unidades generadoras a carbón al año 2040, equivalente al retiro de 5.500 MW, lo que contrasta con el escenario de referencia que consideraba el retiro de 2.500 MW de capacidad instalada en base a carbón al año 2050, quedando en operación unidades de generación con menos de 40 años de antigüedad en el 2050²². La figura 2 ilustra tanto la (a) Trayectoria de retiro de centrales a carbón, así como la consecuente (b) Evolución del parque generador con retiro de centrales a carbón, basada fundamentalmente en la expansión basada en centrales eólicas y solares (tanto fotovoltaicas como de concentración).

Figura 2. Retiro de centrales a carbón

(a) Trayectorias de retiro de centrales a carbón



(b) Evolución del parque generador con retiro de centrales a carbón



Nota: Proyección corresponde a la evaluación aislada de la medida de mitigación de GEI: Retiro de centrales a carbón, por lo que representa el escenario de Referencia más el retiro.

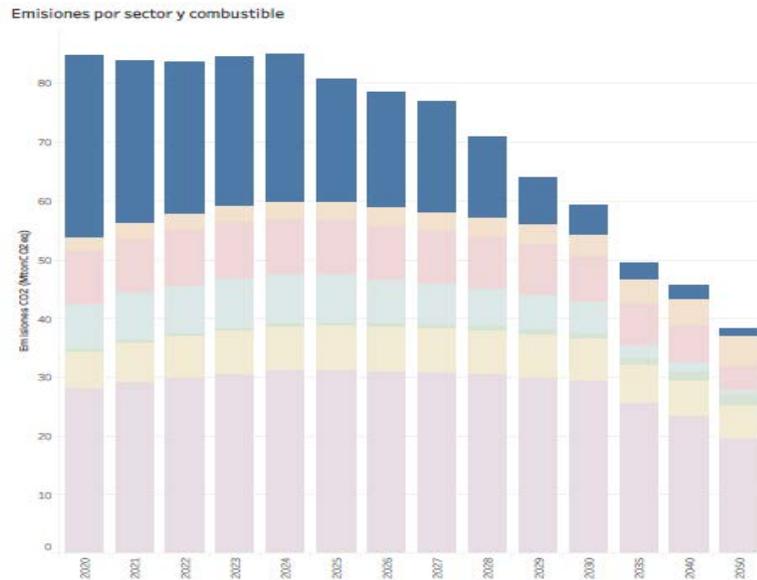
Fuente: Ministerio de Energía (2019)

En consecuencia, según el Acuerdo señalado, un retiro absoluto al 2040 significaría sacar la principal fuente emisora de GEI del sector eléctrico, por lo que las emisiones del sector disminuirían sustancialmente, con cifras que alcanzarían un 80% de reducción al 2050 (Ministerio de Energía, 2019). El gráfico 6 ilustra la proyección de emisiones del sector de generación eléctrica²³.

²¹ Ministerio de Energía (2019) Acuerdo de Retiro de Carbón. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/plan_de_retiro_y_o_reconversion_centrales_carbon.pdf. (Diciembre 2021).

²² *Ibidem*.

²³ Ministerio de Energía. Proyección de Emisiones. Disponible en: <https://energia.gob.cl/panel/proyeccion-de-emisiones>. (Diciembre 2021).

Gráfico 6. Proyección de emisiones del sector de generación eléctrica

Fuente: Ministerio de Energía. Color resaltado para el sector eléctrico.

El gráfico muestra que hacia 2040 las emisiones del sector eléctrico serían mínimas, comparadas con otros sectores de la economía.

b. Retiro de centrales a carbón previo al año 2040

En el marco del informe preliminar de la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027²⁴ del Ministerio de Energía (2021), se consideran distintos escenarios para la trayectoria de retiro de centrales a carbón. Considerando que los nuevos –y recientes– anuncios de retiro de centrales a carbón

dan señales de un adelantamiento progresivo en la salida del carbón desde la matriz eléctrica²⁵, a lo que se suma la integración masiva de energías renovables a gran escala y a nivel distribuido, una expansión y adaptación eficiente y oportuna de los sistemas de transmisión y adopción e implementación tecnológica acelerada, que como se señala, permitirán adelantar cada vez más el retiro total de carbón respecto a la fecha límite indicada en el Acuerdo de junio de 2019.

A continuación, se presentan los escenarios señalados, y se especifican respectivos años para el retiro total del carbón (ver gráfico 7):

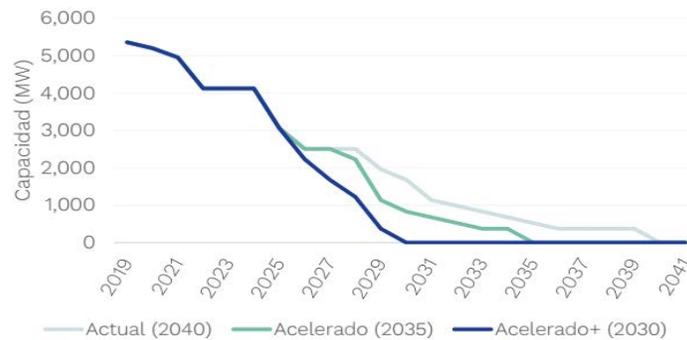
²⁴ Ministerio de Energía (2021). “Informe PELP 2023-2027”. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pelp2023-2027_informe_preliminar.pdf. (Diciembre 2021).

²⁵ El retiro de carbón habilita la electrificación directa e indirecta de consumos, pieza clave para alcanzar la meta de carbono neutralidad antes del año 2050.

- Recuperación Lenta Covid (RPC), considera un retiro total de carbón al año 2040,
- Rumbo Carbono Neutralidad (RCN), considera el retiro total al año 2035
- Acelerando la Transición Energética (ATE), considera el retiro total al año 2030

En todos los escenarios se observa una alta velocidad de retiro durante la presente década, ralentizada hacia la década posterior.

Gráfico 7 Trayectoria de retiro de centrales a carbón en los escenarios de la PELP 2023-2027



Fuente: PELP 2023–2027, Ministerio de Energía (2021)

Al respecto, la PELP 2023–2027, indica que en todos los escenarios energéticos considerados, existiría una gran disminución de emisiones de CO₂eq. Así, como se observa en la tabla 1, la reducción sería más pronunciada en el escenario “Acelerando la Transición Energética”, que reduce sus emisiones en 64% con respecto al 2050 al año 2018²⁶, seguida por el escenario “Rumbo a la Carbono Neutralidad”, que reduce sus emisiones en 56% al año 2050 con respecto al 2018.

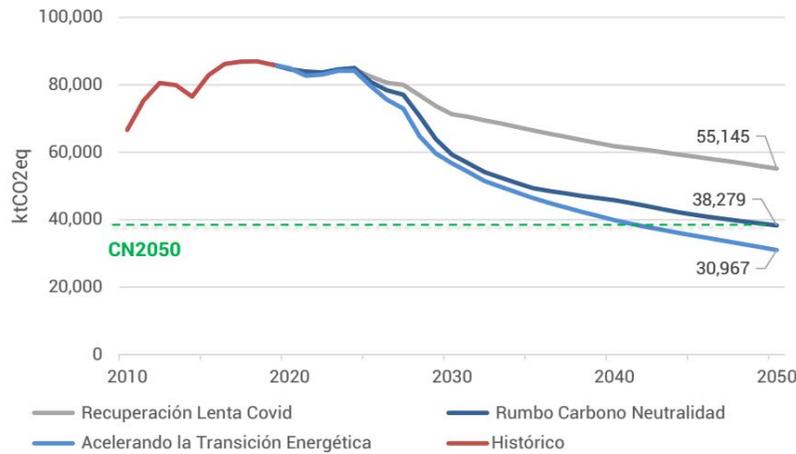
Tabla 1. Proyecciones de emisiones globales en cada uno de los escenarios de la PELP 2023-27.

ESCENARIO	Emisiones CO ₂ eq Energía			Reducción al 2030 c/r a 2018	Reducción al 2050 c/r a 2018
	2030	2040	2050		
Recuperación Lenta Covid	71,247	61,803	55,145	-18%	-37%
Rumbo Carbono Neutralidad	59,275	45,751	38,279	-32%	-56%
Acelerando la Transición Energética	56,725	39,882	30,967	-35%	-64%

Fuente: Informe preliminar PELP 2023 – 2027, Ministerio de Energía (2021).

En este sentido, como se observa en el gráfico 8, en todos los escenarios se prevé un *peak* de emisiones del sector energético al año 2024, en acuerdo con la meta de la NDC. Mientras que, según se indica, para alcanzar la meta de carbono neutralidad al 2050 (CN2050), el sector energía debiera emitir un máximo de 38,634 ktCO₂eq en el año 2050, lo que se alcanzaría en el escenario “Rumbo a la Carbono Neutralidad” en el año 2050, mientras que el escenario “Acelerando la Transición Energética” lo cumpliría el 2042.

²⁶ De acuerdo al último inventario de gases de efecto invernadero (INGEI), el sector energía alcanzó 86,954 ktCO₂eq el año 2018. Ministerio de Medio Ambiente, 2021.

Gráfico 8. Proyecciones de las emisiones del sector de energía en los escenarios considerados en la PELP 2023 – 2027.

Fuente: PELP 2023-2027

Adicionalmente, se destaca que -particularmente en el sector eléctrico- casi se logra neutralizar sus emisiones al 2050²⁷, alcanzando una reducción de 96% al año 2050 con respecto al INGEI 2018, lo que ocurriría en gran medida debido al retiro de centrales a carbón al año 2040 (Ministerio de Energía, 2021).

VIII. BID (2021): Evaluación del plan de carbono-neutralidad de Chile

El mes de agosto del año 2021, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2021) publicó el informe “**Opciones para lograr la carbono neutralidad en Chile: Una evaluación bajo incertidumbre**”²⁸, en el que se presenta un estudio que identifican condiciones que pondrían en riesgo los objetivos de reducción de emisiones, presentando luego propuestas de expansión de medidas que debiesen considerarse en futuros planes sectoriales que mitiguen las vulnerabilidades identificadas, lo que además incluye el refuerzo de acciones existentes y la adición de otras (BID, 2021).

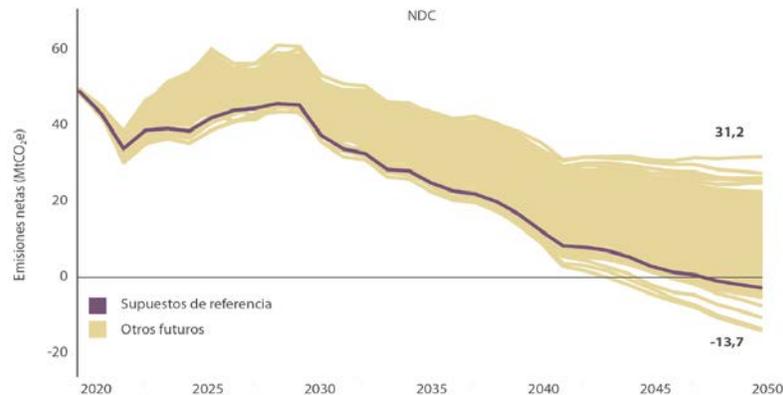
Entre sus resultados se destaca que, si bien en un escenario de referencia (supuestos actuales)²⁹ las transformaciones sectoriales indicadas en la NDC permitirían alcanzar la meta de carbono-neutralidad en 2050, no se lograrían los objetivos intermedios de reducción de emisiones para 2030. Según se indica, lo anterior ocurre debido a que en el mediano plazo las emisiones del sector eléctrico disminuyen, pero no lo suficiente como para compensar los incrementos en los sectores transporte, edificios, comercial, agricultura, economía circular e industria y minería.

²⁸ BID (2021). “Opciones para lograr la electroneutralidad en Chile. Una evaluación bajo incertidumbre”. En: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Opciones-para-lograr-la-carbono-neutralidad-en-Chile-una-evaluacion-bajo-incertidumbre.pdf>. (Diciembre 2021).

²⁹ Este corresponde al escenario de referencia que se utilizó para diseñar medidas sectoriales para cumplir con la NDC

Por lo anterior, y a partir de la construcción de 1.000 futuros diferentes³⁰, el BID plantea que con el propósito de garantizar la carbono-neutralidad al 2050, es necesario robustecer las medidas sectoriales consideradas. Lo anterior, debido a que, al simular el comportamiento de escenarios futuros, se constata que “existen muchas trayectorias de emisiones plausibles en que las emisiones terminan muy por arriba del objetivo de carbono-neutralidad”³¹ (BID, 2021), indicando que el rango de emisiones al 2050 es bastante amplio, al cubrir entre -13,7 MtCO₂eq y 31,2 MtCO₂eq.

Gráfico 9. Emisiones netas totales bajo la estrategia NDC en 1.000 futuros.



Fuente: BID, 2021.

Ante la necesidad de robustecer las medidas propuestas en la NDC, se consideran medidas sectoriales complementarias (NDC+). Entre ellas, en el sector energético, destacan las asociadas a la generación eléctrica, donde se plantea la insuficiencia del retiro gradual de centrales de carbón para 2040, por lo que se plantea la necesidad de adelantar la fecha límite al 2030, fijando además la meta de cierre de centrales de gas natural para 2050. Adicionalmente, como se da observa en la tabla 2, se proponen medidas en el sector energético vinculadas con el transporte (electromovilidad e hidrógeno), comercial (electrificación), industria y minería, residencial y economía circular.

Según se indica, al aplicar dichas medidas complementarias, la estrategia NDC+ permitiría cumplir con la meta de carbono-neutralidad en 2050 en un mayor número de escenarios futuros: el 83% de las simulaciones resultan en emisiones netas negativas o nulas para el 2050. Con esto se contribuiría a reducir en 1,3 MtCO₂eq las emisiones en 2050, y es aún más significativamente al 2030 al contribuir con una disminución de 10,3 MtCO₂eq, respecto al escenario de referencia (NDC). En consecuencia, cumpliría con el objetivo de reducción de emisiones para 2030.

³⁰ El conjunto de futuros se desarrolló abarcando decenas de factores de incertidumbre sugeridos en los talleres participativos, como los de índole económica (por ejemplo, niveles de producción de actividades mineras), tecnológica (costos de baterías) y ambiental (por ejemplo, capacidad de secuestro de los bosques).

³¹ Entre aquellas medidas identificadas con posibilidad de falla en alcanzar la meta, el BID (2021) destaca, como uno de los factores más determinantes, a un bajo nivel de secuestro de los bosques combinado con una baja electrificación del transporte privado. Así también, se hace referencia a un escenario – de no cumplimiento de la meta - en donde se combina un alto costo de la tecnología solar térmica, alta intensidad energética de la producción de cobre, baja electrificación de la minería de cobre, y baja penetración del hidrógeno en el transporte de carga.

Tabla 2. Medidas del sector electricidad en la NDC y medidas adicionales incluidas en la NDC+

Sector	Transformación sectorial	NDC	NDC+
Generación eléctrica 	Retiro gradual de centrales de carbón	Retiro gradual de centrales de carbón para 2040.	Retiro gradual de centrales de carbón para 2030.
	Retiro de centrales de gas natural	-	Retiro de centrales de gas natural para 2050.
Transporte 	Electromovilidad	Vehículos particulares: un 58% a 2050; taxis: un 100% a 2040 y 2050; transporte público: un 100% a 2040.	Vehículos particulares: un 58% a 2050; taxis: un 100% a 2040 y 2050; transporte público: un 100% a 2040.
	Hidrógeno	Transporte de carga: un 85% a 2050; aviación: un 0% a 2050.	Transporte de carga: un 85% a 2050; aviación: un 10% a 2050.
Comercial 	Electrificación de usos finales	Un 70% de demanda a 2050.	Un 70% de demanda a 2050.
Industria y minería 	Sistemas solares térmicos	Un 33% en industrias varias a 2050; un 16% en minería de cobre a 2050.	Un 46% en industrias varias a 2050; un 30% en minería de cobre a 2050.
	Hidrógeno: usos en procesos térmicos	Un 3% en industrias varias; un 0% en la industria del acero.	Un 3% en industrias varias; un 10% en la industria del acero (+10% biomasa).
	Hidrógeno: usos motrices	Un 37% para minería rajo abierto a 2050; un 8% para minería subterránea a 2050; un 12% en industrias varias a 2050; un 21% en minas varias a 2050.	Un 37% para minería rajo abierto a 2050; un 8% minería subterránea a 2050; un 12% en industrias varias a 2050; un 21% en minas varias a 2050.
	Electrificación de usos motrices	Un 88% en industrias varias a 2050; un 74% en minas varias a 2050.	Un 88% en industrias varias a 2050; un 74% en minas varias a 2050.
	Electrificación de usos del cobre	Un 57% en uso final bajo cielo abierto.	Un 57% en uso final bajo cielo abierto.
Residencial 	Calefacción eléctrica residencial	Un 56% en casas a 2050; un 70% en departamentos a 2050.	Un 72% en casas a 2050; un 89% en departamentos a 2050.
	Electrificación para cocción	Un 36% en casas a 2050; un 35% en departamentos a 2050.	Un 36% en casas a 2050; un 35% en departamentos a 2050.
	Sistemas solares térmicos	Un 52% de agua caliente sanitaria (ACS) en casas; un 57% de ACS en departamentos.	Un 80% de ACS en casas; un 80% de ACS en departamentos.
	Reacondicionamiento térmico	Entre 570.00 y 650.000 casas.	Un total de 6.197.750 casas.
Economía circular	Biogás	Captura y combustión de biogás en el 100% de los rellenos sanitarios para 2030.	Captura y combustión de biogás en el 100% de los rellenos sanitarios para 2030.

Fuente: BID (2021)

Creative Commons Atribución 3.0
(CC BY 3.0 CL)