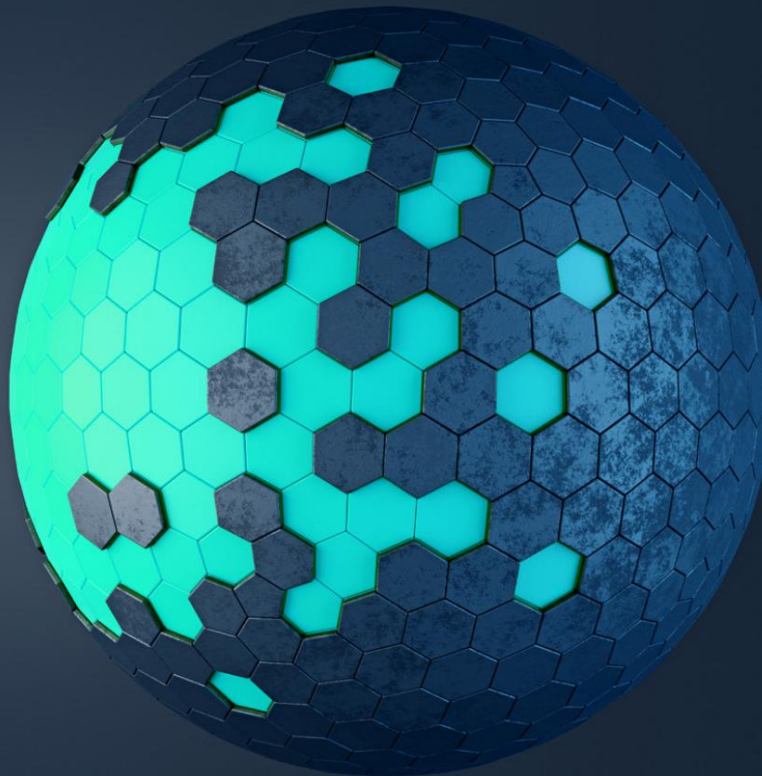


Diez realidades físicas que debe abordar la transición energética

La transición energética supondría una transformación física a gran escala. A continuación, se presentan diez realidades que deben afrontarse para que tenga éxito.

por Mekala Krishnan, Chris Bradley, Humayun Tai y Tiago Devesa



La transición energética ha experimentado un impulso significativo, pero diversas fuerzas generan incertidumbre. Entre ellas, se incluyen los cambios geopolíticos, la incertidumbre política en muchos países, el entorno macroeconómico y la creciente demanda energética derivada de la adopción de herramientas de inteligencia artificial, por mencionar solo algunas.

Pero incluso ante estos problemas a corto plazo, incertidumbres, es importante no perder de vista el desafío central —a largo plazo— que está en el corazón de la transición. La transición energética es una transformación física a gran escala. Miles de millones de los componentes asociados con el sistema actual de producción y consumo de energía, altamente complejo, interconectado y optimizado, tendrían que transformarse —sustituyendo las tecnologías de altas emisiones que dependen de combustibles fósiles por una nueva generación de opciones de bajas emisiones— con la aspiración de lograrlo en tan solo unas décadas. Esto requerirá abordar, como lo expresó nuestro informe de 2024, los "problemas difíciles": lidiando con los desafíos físicos asociados con el desarrollo y despliegue de tecnologías de bajas emisiones y alto rendimiento y la infraestructura asociada y las cadenas de suministro que necesitan para operar.¹

Ya estamos viendo manifestarse la naturaleza física de la transición. Por un lado, el despliegue físico global de tecnologías limpias como las energías renovables y los vehículos eléctricos ha continuado.

Acelerar. Se estima que la capacidad instalada de energía renovable (liderada por despliegues récord de energía solar) aumentó más del 10 % entre 2023 y 2024, y las ventas de vehículos eléctricos de pasajeros...

tanto los vehículos eléctricos de batería (BEV) como los híbridos enchufables (PHEV), en más del 25 por ciento entre 2023 y 2024.² Y las tecnologías siguen mejorando, incluidos, por ejemplo, los vehículos eléctricos de mayor autonomía, las nuevas tecnologías de almacenamiento estacionario y las bombas de calor de fuente de aire que pueden proporcionar calor ininterrumpido a temperaturas inferiores a -20 °C.³

Sin embargo, cada vez es más evidente que se necesita hacer más para abordar los desafíos físicos de frente. Por ejemplo, a medida que los sistemas eléctricos incorporan una mayor proporción de energías renovables como la solar y la eólica, que son, por naturaleza, variables, existe un creciente reconocimiento de la necesidad de gestionar la volatilidad.⁴ La creciente demanda de energía de los centros de datos también ha demostrado el desafío de ampliar la capacidad energética. En Estados Unidos, los proyectos de interconexión suelen tardar casi cinco años desde la solicitud de interconexión hasta la operación comercial, y se estima que el 70 % de las líneas de transmisión tienen más de 25 años y necesitarían ser reemplazadas en un plazo de diez a veinte años.⁵

En general, será necesario hacer más para abordar los desafíos físicos asociados con la expansión a gran escala de las tecnologías de bajas emisiones. ¿Cuáles son esos desafíos y cómo deberían abordarlos las partes interesadas? Para respaldar la toma de decisiones, [nuestro análisis...](#) Publicado en 2024 es lo que creemos que es el primer balance exhaustivo de esos desafíos físicos.⁶

En este artículo, nos basamos en esa investigación para destacar diez ideas clave que son relevantes para los componentes centrales de la transición: el sector energético, que está en el corazón de la transición; los tres principales sectores de uso final, a saber, la movilidad (vehículos de carretera y otras formas de transporte para mover personas y cosas), la industria (que fabrica una amplia gama de materiales y bienes como acero y cemento) y los edificios (instalaciones que consumen energía para iluminación, calefacción y más); y, finalmente, los tres facilitadores de la transformación del sistema energético, a saber, las materias primas (en particular los minerales críticos necesarios para muchas tecnologías de bajas emisiones como baterías y electrolizadores), los nuevos portadores de energía (como el hidrógeno y los biocombustibles) y los enfoques de captura de carbono y reducción de energía para gestionar las emisiones restantes.

1

El sistema energético actual es de alto rendimiento pero también tiene fallas

El sistema energético actual tiene cinco propiedades altamente beneficiosas que le ayudan a ofrecer un alto rendimiento (Gráfico 1).

Por ejemplo, puede mover energía con relativa facilidad. a donde se necesita porque los combustibles actuales son

Con alta densidad energética y fácil transporte. Un solo buque cisterna promedio con gas natural licuado puede abastecer a más de 40.000 hogares en Estados Unidos durante un año entero.

Es despachable y puede aumentar o disminuir el suministro de energía rápidamente, al lugar correcto en el momento oportuno. Una central eléctrica con turbina de gas puede pasar de una parada total a generar energía a plena capacidad en menos de diez minutos.

Y los combustibles fósiles son una fuente capaz de generar calor a alta temperatura en la producción de materiales industriales, mientras que su flexibilidad química les permite ser utilizados no sólo como fuentes de energía, sino también como materias primas (por ejemplo, proporcionan moléculas en las que se basan los plásticos).

Pero el sistema energético actual presenta fallas. Dos de ellas destacan. En primer lugar, es ineficiente, ya que alrededor de dos tercios de toda la energía se desperdician actualmente, principalmente debido a la baja eficiencia energética en la conversión y el uso de combustibles fósiles.⁹ En segundo lugar, la producción y el consumo de energía contribuyen a más del 85 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂).¹⁰

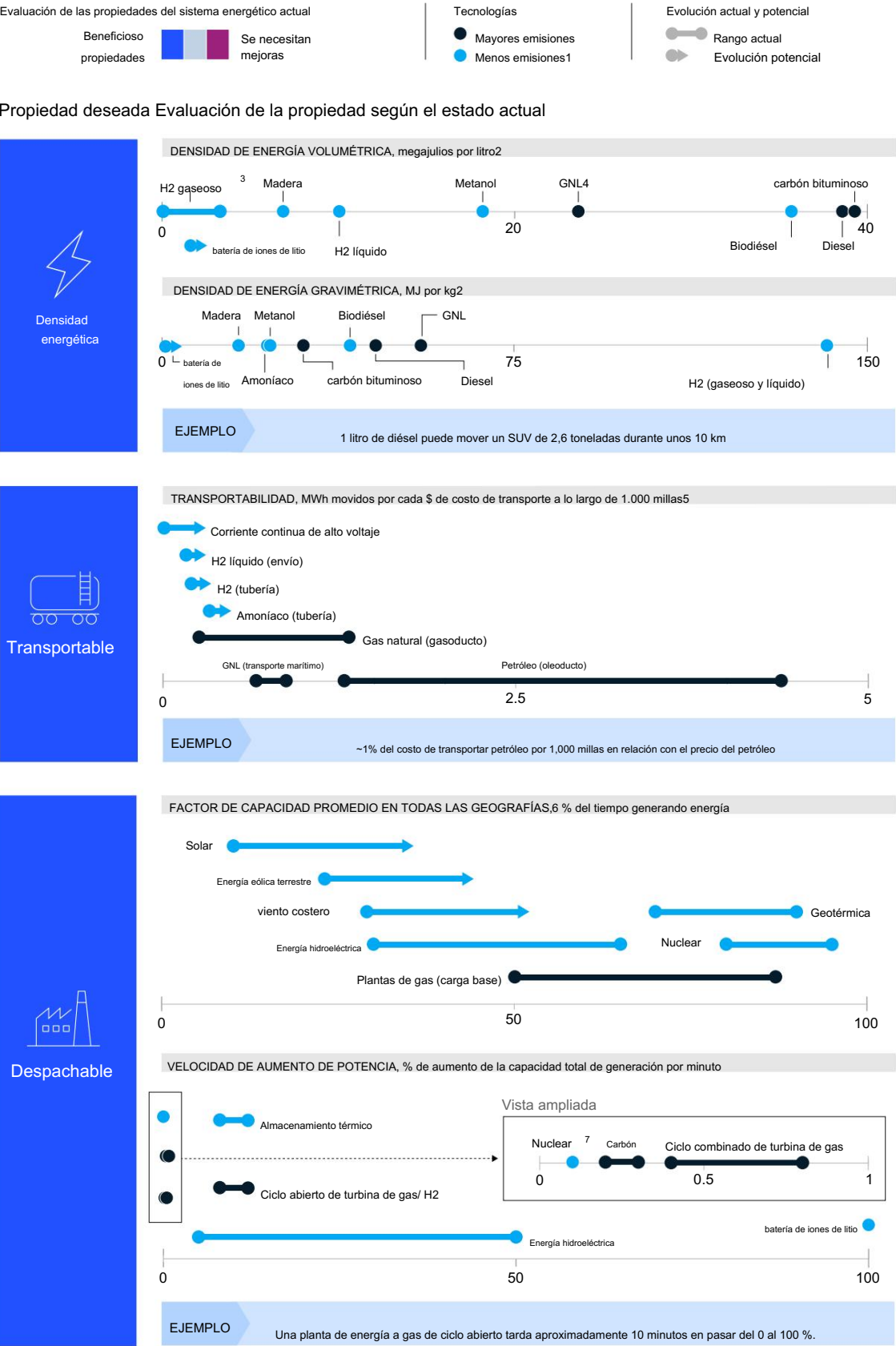
Por lo tanto, la transición energética requeriría replicar los beneficios y el rendimiento del sistema actual y abordar al mismo tiempo sus desventajas.

La buena noticia es que, en algunas partes del sistema energético, las tecnologías de bajas emisiones ya suelen igualar o incluso superar ese rendimiento. Por ejemplo, las baterías pueden proporcionar una capacidad de despacho más rápida que incluso las centrales de gas para picos de demanda, y las centrales nucleares suelen tener factores de capacidad más altos que las centrales de gas. Y muchas tecnologías limpias están mejorando rápidamente su rendimiento.

Aun así, persisten deficiencias de rendimiento. Hoy en día, combustibles como el diésel tienen una densidad de energía gravimétrica (o energía por unidad de peso) aproximadamente 50 veces mayor que las baterías utilizadas en los coches eléctricos.¹¹ La electricidad y muchos vectores energéticos de bajas emisiones, como el hidrógeno, son más difíciles y costosos de transportar a largas distancias que los combustibles fósiles. En general, la transición energética requerirá seguir mejorando el rendimiento de las tecnologías de bajas emisiones y combinarlas de nuevas maneras para ofrecer un alto rendimiento.

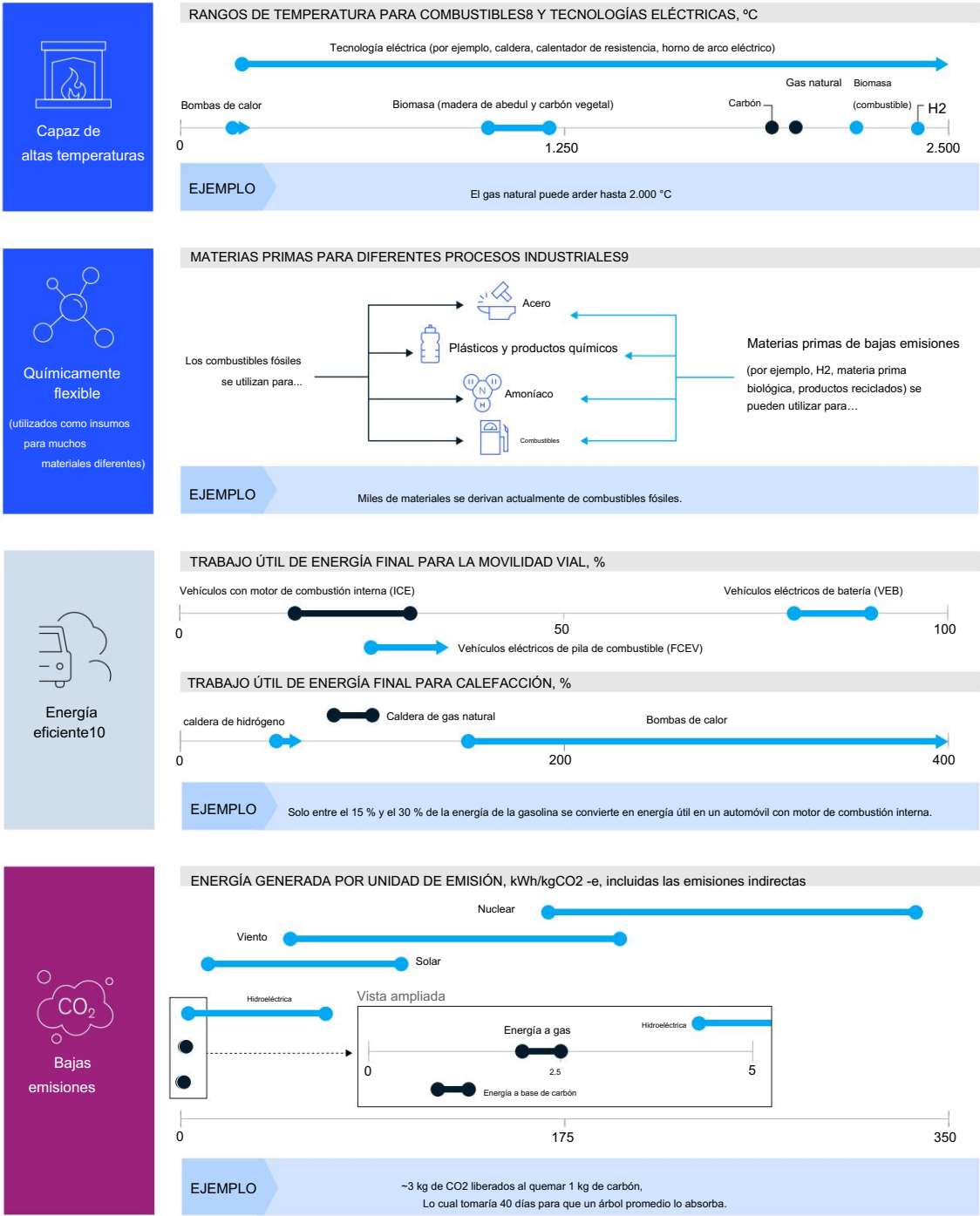
Anexo 1

El sistema energético actual tiene propiedades beneficiosas pero produce altas emisiones.



Anexo 1 (continuación)

Propiedad deseada Evaluación de la propiedad según el estado actual



Nota: Esta ilustración evalúa el estado actual de las propiedades críticas de cada tecnología para definir los componentes básicos de un nuevo sistema. En la práctica, un nuevo sistema no consistiría en sustituciones individuales, por lo que el rendimiento del sistema depende no solo del rendimiento de cada tecnología, sino también de cómo está interconectado. Las tecnologías son ilustrativas y no exhaustivas.

1 Algunas de las opciones clasificadas como "de menores emisiones" pueden suponer una gama de diferentes perfiles de emisiones potenciales dependiendo de cómo se produzcan (por ejemplo, el amoníaco).

² Mayor poder calorífico. ³ Disponible en diferentes presiones, desde 1 a 350 bar. ⁴ GNL = gas natural licuado.

⁵ Los costos de transmisión incluyen los costos operativos

totales y el costo de capital amortizado para la construcción de nuevas líneas. Las comparaciones de costos de la energía transportada tienen limitaciones importantes, incluyendo el hecho de que excluyen 6 Excluye los activos escala, se producen pérdidas aguas arriba y aguas abajo en la generación y el uso de esa energía. utilizados únicamente para proporcionar flexibilidad energética. 7 En el caso de la energía nuclear a gran

⁸ Temperatura de llama a la que pueden arder estos combustibles; las temperaturas reales pueden ser inferiores debido a pérdidas de energía. ⁹ Por ejemplo, el carbón en la fabricación de acero; el gas natural en la producción de amoníaco, productos químicos, plásticos y acero, y en combustibles; el petróleo en combustibles y en la producción de productos químicos y plásticos. Las materias primas de bajas emisiones, como el hidrógeno y las materias primas de origen biológico, pueden utilizarse para producir amoníaco, productos químicos, plásticos y acero. ¹⁰ A partir de la electricidad para el H₂, las bombas de calor y los vehículos eléctricos de batería (BEV), y de los combustibles fósiles para calderas y motores de combustión interna (ICE); incluye usos locales y excluye el transporte de hidrógeno a larga distancia.

Fuente: Departamento de Energía de EE. UU.; Laboratorio Nacional de Energías Renovables; Agencia Internacional de la Energía; Asociación Nuclear Mundial; Agencia Internacional de Energías Renovables; Administración de Información Energética de EE. UU.; Alianza Europea de Investigación Energética; Comisión de Transiciones Energéticas; Consejo del Hidrógeno; Coalición Científica del Hidrógeno; GTK; Agora Industry; Ambienta; De Santis et al. (2021); Galimova et al. (2023); Instituto Oxford de Estudios Energéticos; Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.; Agencia Europea del Medio Ambiente; análisis del McKinsey Global Institute.

2

Solo se ha implementado alrededor del 10 por ciento de las tecnologías de bajas emisiones necesarias para 2050 a fin de cumplir los compromisos globales.

Transformar el sistema energético requeriría la sustitución de miles de millones de activos físicos. Según el escenario de Compromisos Cumplidos para 2023 de McKinsey, para alcanzar los compromisos climáticos nacionales declarados, se necesitarían aproximadamente mil millones de vehículos eléctricos, más de 1500 millones de bombas de calor y unos 35 teravatios de bajas emisiones.

Por ejemplo, sería necesario desplegar capacidad de generación de energía para 2050.¹²

Ha habido un impulso hacia ese despliegue.

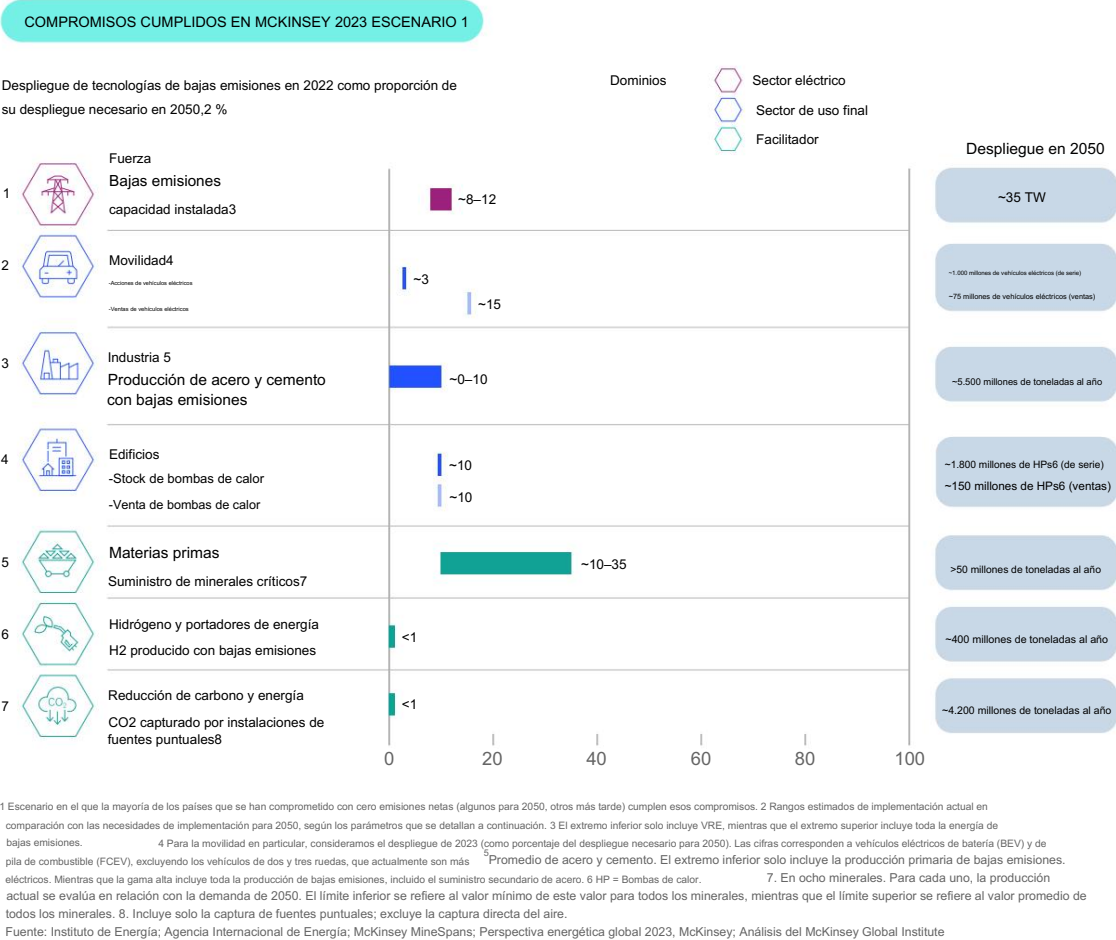
Por ejemplo, se estima que casi el 90 % de las ventas totales de vehículos eléctricos de pasajeros y el 60 % de las ampliaciones de capacidad de energía solar y eólica se produjeron tan solo en los últimos cinco años.¹³ Sin embargo, hasta la fecha, el despliegue de tecnologías de bajas emisiones solo representa alrededor del 10 % de los niveles requeridos para 2050 para cumplir con los compromisos globales en la mayoría de las áreas, y mucho menos en otras (Gráfico 2). Por ejemplo, menos del 1 % de los 90 millones de toneladas de hidrógeno que se producen hoy en día provienen de la producción de bajas emisiones.

Por lo tanto, en general, la transición energética se encuentra en sus primeras etapas.¹⁴

Hasta ahora, el despliegue de tecnologías de bajas emisiones se sitúa sólo en alrededor del 10 por ciento de los niveles requeridos para 2050 para cumplir con los compromisos mundiales en la mayoría de las áreas. y mucho menos que eso en otros.

Anexo 2

La implementación de enfoques clave de descarbonización se encuentra en una etapa temprana en la mayoría de los ámbitos.



McKinsey & Company

3

Una metamorfosis del sistema de poder tiene que estar en el centro de la transición

La transformación del sistema eléctrico es fundamental para toda la transición energética porque reducir las emisiones en los grandes sectores consumidores de energía (movilidad, industria y edificios) implicaría una electrificación radical, según la mayoría

escenarios de transición.

El sistema eléctrico no solo necesitará crecer, sino hacerlo al mismo tiempo que reduce sus propias emisiones. Según el escenario de Compromisos Cumplidos de McKinsey para 2023, el sistema eléctrico mundial necesitaría quintuplicar su tamaño (capacidad de generación instalada) de aquí a 2050 a medida que se electrifiquen los sectores de uso final. Al mismo tiempo, la proporción de energía generada a partir de energía de baja... Las fuentes de emisiones tendrían que más que duplicarse a más del 90 por ciento.¹⁵

Estos cambios tienen profundas implicaciones sobre cómo deberá configurarse y funcionar el sistema energético.

Tomemos el ejemplo de Alemania para ilustrar esto (Gráfico 3).

Según el escenario de Compromisos Cumplidos 2023 de McKinsey, para cumplir sus compromisos climáticos Alemania podría necesitar duplicar la cantidad de energía que genera, y la proporción de energía generada por fuentes de energía renovable variable (ERV), como la solar y la eólica, podría necesitar hasta triplicarse.

El sistema eléctrico tendría entonces que transformarse en uno tres veces más grande en términos de capacidad de generación instalada en este escenario y tener una utilización general menor.

Esto se debe en parte a que un sistema alimentado con energías renovables requiere activos flexibles que puedan proporcionar energía de reserva cuando no hay sol ni viento. activos como plantas de energía térmica de respaldo (como las de gas o hidrógeno), almacenamiento y más interconexiones con otros mercados energéticos.

Por lo tanto, incluso aunque la producción de energías renovables aumente, el tamaño del sistema térmico puede permanecer estable, en lugar de reducirse.

La utilización del sistema térmico disminuiría a medida que se convirtiera en una fuente de respaldo en lugar de energía constante o carga base.

Pero la necesaria transformación del sistema eléctrico va más allá de su cambio en el perfil de utilización. Dado que los activos renovables variables a veces pueden ser más pequeños, estar más alejados de donde se necesita la energía y estar más distribuidos, el tamaño de las líneas de transmisión y distribución de la red tendría que aumentar. La Agencia Internacional de la Energía, por ejemplo, proyecta que el volumen de las líneas de transmisión y distribución tendría que casi triplicarse a nivel mundial, o crecer más del 3 % anual, en un escenario de cero emisiones netas para 2050.¹⁶

Anexo 3

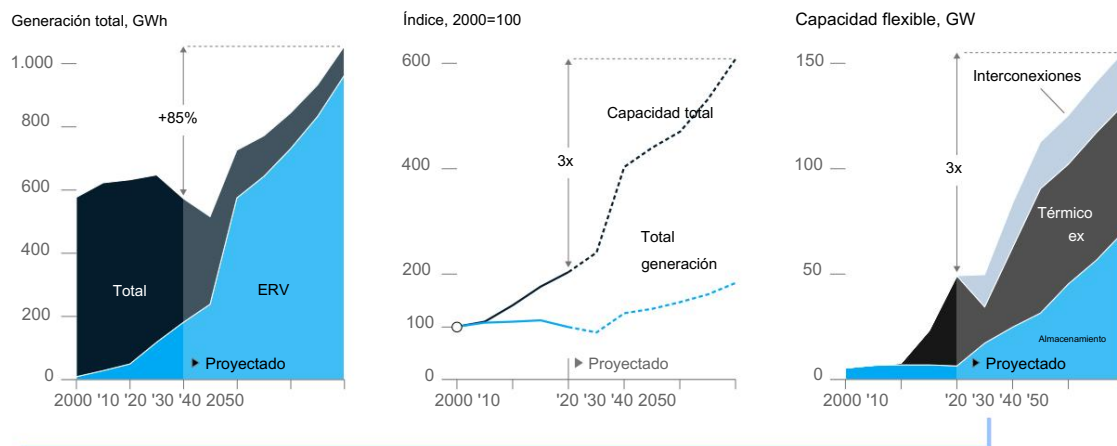
Los sistemas con alto consumo de VRE requieren más capacidad para brindar flexibilidad.

ESCENARIO DE COMPROMISOS CUMPLIDOS DE MCKINSEY 2023

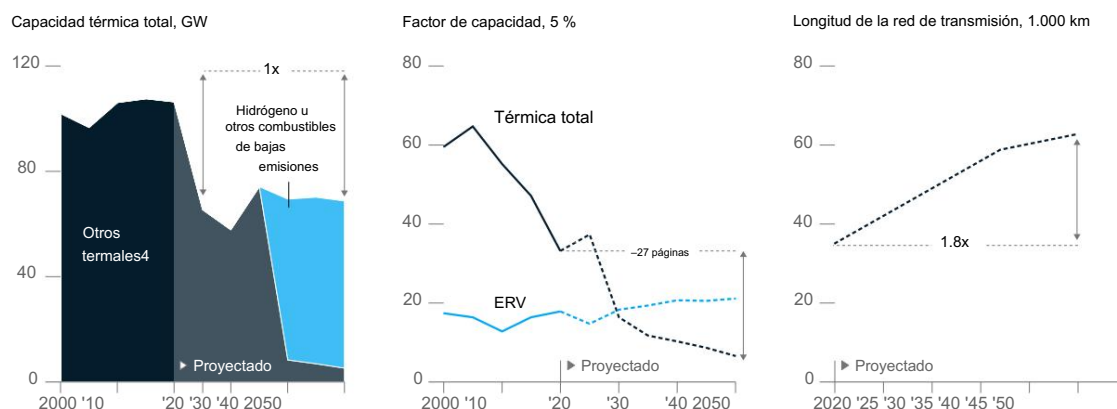
ILUSTRACIÓN DE ALEMANIA

Cambios en el sistema eléctrico alemán, 2000-50

- 1 A medida que el sistema eléctrico se amplía y la penetración de VRE aumenta ...1 → 2 ...la capacidad total aumenta mucho más rápido que la generación total.2 → 3 Como la capacidad flexible requiere un cambio radical ...3



- 4 ...la capacidad térmica permanece en el sistema para proporcionar flexibilidad... → 5 ...lo que conduce a tasas de utilización más bajas... → 6 ...y la red se expande



1 La energía renovable variable (ERV) se refiere a fuentes de energía como la solar y la eólica, que producen electricidad dependiendo de las condiciones naturales (por ejemplo, cuando brilla el sol o sopla el viento). La capacidad incluye todas las formas de activos de generación. 2 La capacidad flexible incluye activos de generación despachables que funcionan a baja utilización (comparada con una utilización del 50%), interconexiones y almacenamiento. 3 La capacidad flexible incluye activos de generación despachables que funcionan a baja utilización (comparada con una utilización del 50%), interconexiones y almacenamiento. La exhibición térmica abarca el carbón, el gas, el gas con captura y almacenamiento de carbono, la energía nuclear, el petróleo, otros activos térmicos limpios y otras fuentes de energía renovables. Las interconexiones se refieren a las conexiones físicas con otros sistemas eléctricos, medidas en megavatios que representan la cantidad máxima de electricidad que se puede importar. El almacenamiento incluye la energía hidroeléctrica de bombeo, el almacenamiento de electricidad de larga duración y las baterías de iones de litio. 4 Incluye carbón, gas natural y petróleo. 5 El factor de capacidad de un activo de generación se calcula dividiendo la producción durante un período de tiempo entre la producción máxima posible si el activo funcionara a plena capacidad de forma continua durante el mismo período.

Fuente: Agencia Internacional de Energía; Administración de Información Energética de EE. UU.; Modelo de Energía de McKinsey; Agencia Federal de Redes (BNetzA); Análisis del McKinsey Global Institute

McKinsey & Company

4

El calor electrizante requerirá gestionar picos de demanda más altos

Las necesidades de calefacción y refrigeración de los edificios representan casi el 85 por ciento del CO2 total emitido por los edificios, y la calefacción de espacios y el calentamiento de agua son responsables de más del 75 por ciento.¹⁷

Actualmente, la necesidad de calefacción se satisface en gran medida mediante la quema de combustibles fósiles, por ejemplo, en calderas de gas. Los combustibles fósiles podrían sustituirse por opciones eléctricas. Las bombas de calor son tecnologías de calefacción altamente eficientes y la principal opción que se está explorando en la mayoría de los mercados.

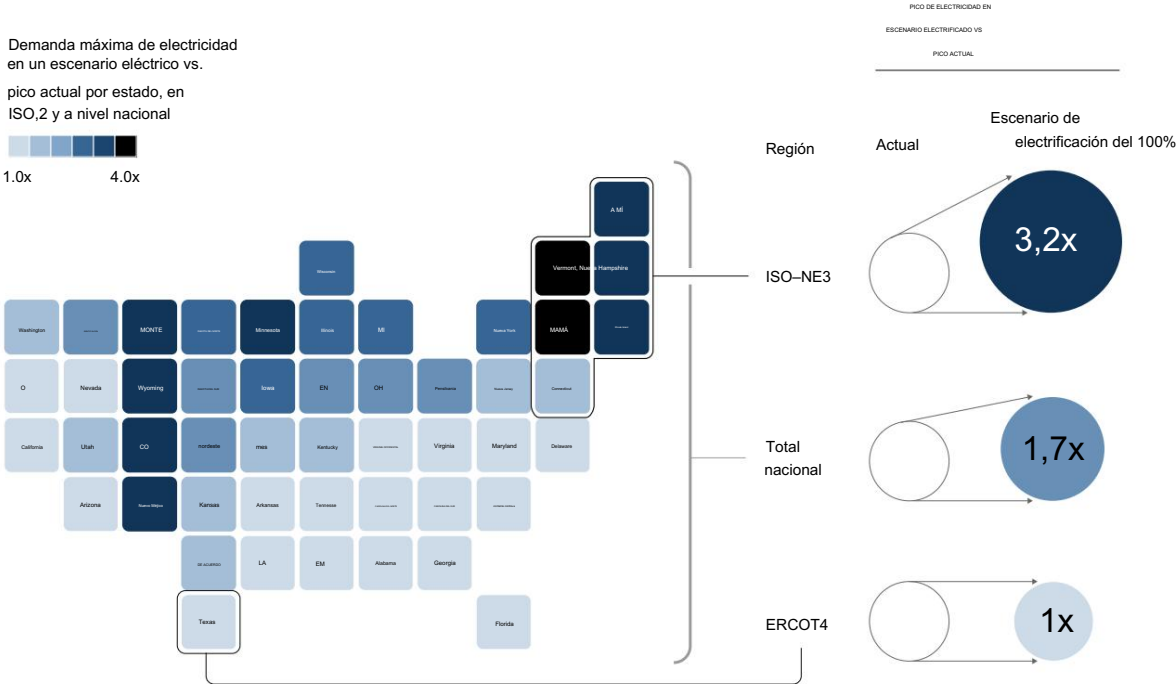
Pero la electrificación generalizada de la calefacción en los edificios solo añadirá otra capa de demanda al sistema eléctrico. La demanda de electricidad se dispararía... De forma drástica, durante las horas más frías de los días más fríos del año, cuando mucha gente se apresura a encender la calefacción al mismo tiempo. En Estados Unidos, por ejemplo, la demanda máxima se desplazaría del verano, cuando muchos edificios usan aire acondicionado, al invierno, a medida que se generalizan las bombas de calor.^{¹⁸}

El crecimiento general de la demanda implica que todo el sistema eléctrico necesitaría más capacidad. Tomemos como ejemplo Estados Unidos. Si las bombas de calor se generalizan, la demanda máxima (la mayor cantidad de energía requerida en un año) podría superar con creces la capacidad máxima de la red eléctrica actual.

Anexo 4

Como ocurre con la electricidad para calefacción, la demanda máxima de electricidad podría triplicarse en algunos estados de EE.UU. si no se gestiona.

Demanda máxima de electricidad proyectada en un escenario de calefacción 100% eléctrica en Estados Unidos vs. la situación actual, sin medidas adicionales de gestión de la demanda¹



1 Basado en el análisis de Waite y Modi (2020), que compara la demanda actual de electricidad con un escenario con el 100 % de electrificación de la demanda actual de calefacción en edificios en EE. UU. Se asume el uso de una bomba de calor de alto rendimiento (percentil 90). Este análisis no considera el crecimiento potencial de la demanda energética ni de la electrificación en otros ámbitos, como la movilidad y la industria. Las cargas máximas se refieren a cargas no coincidentes. Alaska y Hawái no se incluyen en el análisis.

2 En Estados Unidos, los operadores de sistemas independientes (ISO) se dividen en diferentes regiones, como ISO-NE y ERCOT.

3 ISO-New England (NE) presta servicios a Connecticut, Maine, Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island y Vermont.

4 El Consejo de Confiabilidad Eléctrica de Texas (ERCOT) presta servicio a la mayor parte, pero no a todo, Texas.

Fuente: Waite y Modi (2020); análisis del McKinsey Global Institute

En un escenario en el que la calefacción de los edificios esté completamente electrificada, una investigación externa ha estimado que la demanda máxima de energía podría ser 1,7 veces el pico actual en todo Estados Unidos.¹⁹

En regiones más frías, este efecto podría ser aún más pronunciado. En Nueva Inglaterra, por ejemplo, la demanda máxima podría ser tres veces mayor que la actual. Recuerde también que las bombas de calor actualmente son menos eficientes a temperaturas más frías. Por ejemplo, cuando las temperaturas bajan de 5 °C a menos 10 °C, el coeficiente de rendimiento de las bombas de calor estándar se reduce prácticamente a la mitad.²⁰

Se podrían implementar medidas para minimizar los picos de demanda (y, por lo tanto, la capacidad energética requerida en el sistema) mediante una combinación de modelos más eficientes de bombas de calor, un mayor uso de tecnologías de calefacción que combinen la electrificación con otras opciones (los llamados sistemas de combustible dual y otras tecnologías) para limitar el uso de electricidad en los días más fríos, o incluso suavizar la demanda de energía desplazando la demanda de calefacción a diferentes horas del día mediante la combinación de bombas de calor con almacenamiento de energía térmica.²¹

El crecimiento general de la demanda implica que todo el sistema eléctrico necesitaría más capacidad.

5

Para que los vehículos eléctricos alcancen su potencial, las redes tendrían que ser más limpias

El despliegue de vehículos eléctricos de batería (VEB) para pasajeros está en aumento, pero su ahorro de CO₂ varía en comparación con los vehículos con motores de combustión interna (MCI). Si bien los VEB para pasajeros pueden tener menores emisiones por kilómetro en funcionamiento que los MCI, presentan mayores emisiones durante su fabricación. Por lo tanto, el ahorro depende de la limpieza de la red eléctrica que los alimenta (Gráfico 5).

Donde las redes ya están relativamente limpias, como en el Unión Europea, vehículos eléctricos pequeños y medianos ya

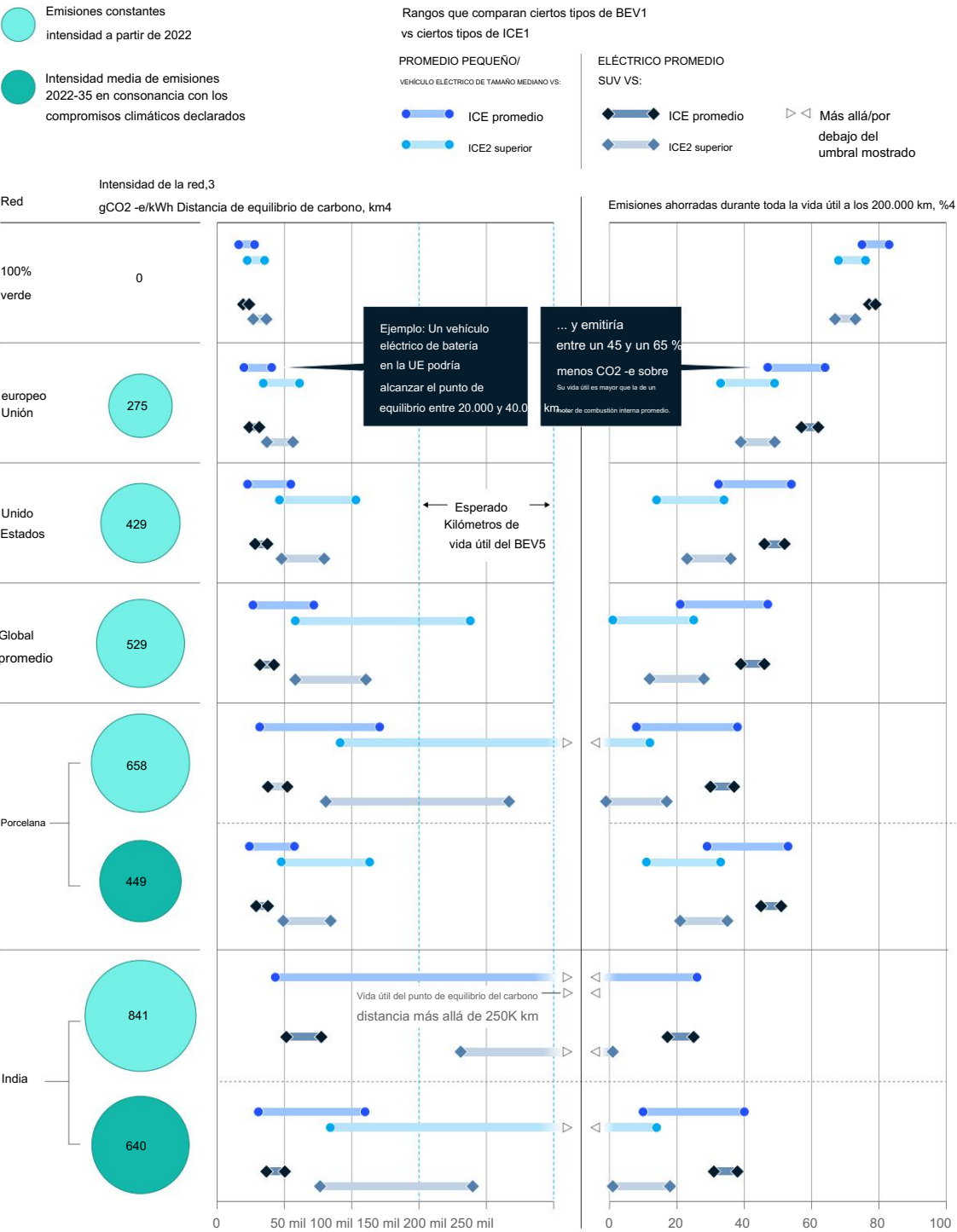
En India, sin embargo, alrededor del 75 por ciento de toda la electricidad se genera hoy usando combustibles fósiles, especialmente carbón.²³ Si no hay ningún cambio en la intensidad de las emisiones de su red, los vehículos eléctricos de batería de pasajeros podrían terminar emitiendo más, en lugar de menos, que los motores de combustión interna de alto rendimiento, y solo un poco menos que los motores de combustión interna promedio.

Por supuesto, las redes eléctricas se están descarbonizando, y si la red eléctrica de la India se descarbonizara según el escenario de Compromisos Cumplidos de McKinsey para 2023, un vehículo eléctrico de batería (BEV) mediano adquirido hoy en India podría lograr ahorros de carbono a lo largo de su vida útil de hasta un 15 % en comparación incluso con un motor de combustión interna de alto rendimiento. Por lo tanto, seguir mejorando la intensidad de las emisiones de la red eléctrica es un factor crucial para reducir las emisiones totales derivadas de la transición a los BEV.

Si bien los vehículos eléctricos de batería (BEV) de pasajeros pueden tener menores emisiones por kilómetro que los de combustión interna, presentan mayores emisiones durante su fabricación. Por lo tanto, el ahorro depende de la limpieza de la red eléctrica que los alimenta.

Anexo 5

La intensidad de las emisiones de la red tiene un gran impacto en el punto de equilibrio de carbono y en el ahorro de emisiones durante la vida útil de los vehículos eléctricos a batería.



1 BEV = vehículo eléctrico de batería; ICE = motor de combustión interna. Los vehículos pequeños y medianos incluyen sedanes, cupés y hatchbacks.
2 Vehículos con mejor rendimiento en eficiencia de combustible (percentil 95).
3 Esto incluye las emisiones ascendentes relacionadas con la generación de energía, que abarcan las emisiones derivadas de la extracción, el procesamiento y el transporte de combustibles.
4 El rango en la exhibición está determinado por la dispersión de valores para el desempeño de emisiones de los BEV y SUV eléctricos promedio contra los ICE promedio y superiores, debido a las características específicas de los autos conducidos, diferentes estimaciones de emisiones en diferentes regiones y otros factores.
5 Basado en el primer y tercer cuartiles de la distribución de lecturas del odómetro de automóviles de 12 años (vida útil promedio de los vehículos) o más en los Estados Unidos en 2017.
Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente; Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.; modelo GREET (Laboratorio Nacional Argonne); Climate Transparency; Centro McKinsey para la Movilidad Futura; análisis del McKinsey Global Institute.

6

La producción de los cuatro grandes materiales industriales requiere temperaturas muy altas. y es más difícil de electrificar y descarbonizar

Los cuatro pilares de la civilización moderna (acero, cemento, plásticos y amoníaco) por sí solos representan aproximadamente dos tercios de las emisiones industriales.²⁴

Estas industrias son particularmente difíciles de descarbonizar por completo, porque dependen en gran medida de combustibles fósiles como materias primas (ingredientes como el petróleo para los plásticos) y como fuente del calor de muy alta temperatura que requiere su producción.²⁵ Las “cuatro grandes” representan la gran mayoría del calor de muy alta temperatura utilizado en la industria energética (Gráfico 6).

Descarbonizar una serie de otras industrias, como la producción de alimentos y la fabricación de papel, no es tan difícil, porque el 90 por ciento del calor que necesitan es de temperatura baja o media.

En todas las industrias (incluidas las cuatro grandes), donde se necesitan temperaturas bajas o medias, existen tecnologías de calefacción eficientes y generalizadas. Estas incluyen, por ejemplo, la electrificación mediante bombas de calor industriales de alta eficiencia, la recuperación de calor residual (por ejemplo, para partes de

el proceso de producción de amoníaco) y el uso de calor generado por energía nuclear o geotérmica. En zonas donde la energía térmica no se utiliza para elevar la temperatura, sino para producir vapor que, a su vez, se utiliza para realizar tareas mecánicas, se podrían utilizar motores eléctricos.

Para abordar áreas que requieren altas temperaturas para aplicaciones térmicas, algunas tecnologías eléctricas de bajas emisiones pueden ser importantes. Se están logrando avances.

En la fabricación de acero, por ejemplo, los hornos de arco eléctrico ofrecen temperaturas muy altas y constituyen una tecnología consolidada. En la industria del cemento y los plásticos, se han iniciado proyectos de electrificación, incluyendo el uso de nuevos calentadores rotodinámicos para proporcionar temperaturas suficientemente altas en la calcinación del cemento o el electrocraqueo para plásticos.

Sin embargo, la implementación de estos enfoques sigue siendo bastante limitada, y muchos aún están en sus etapas iniciales. Escalarlos también requeriría reconfiguraciones masivas de activos. Esto se debe a que la forma de transferencia de calor a menudo

Es necesario cambiar. Otras fuentes de calor, como los combustibles alternativos como los biocombustibles, podrían producir calor a alta temperatura y, a menudo, requerirían menos modernización, pero podría haber dificultades para obtener insumos fiables.

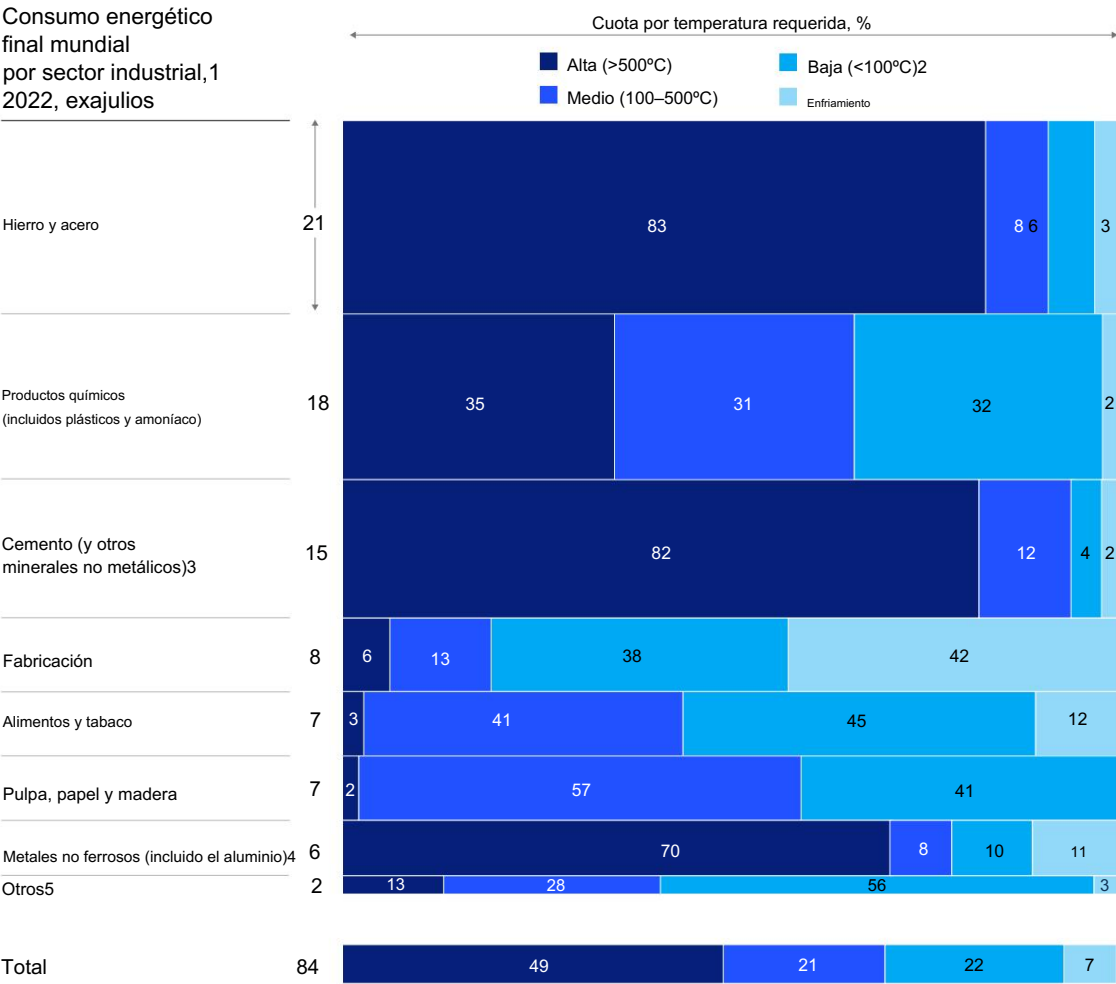
Si bien estos desafíos son difíciles de superar, esta transformación también podría generar nuevas oportunidades.

La electrificación suele ser rentable. La electrificación de los procesos industriales también puede generar nuevas formas de demanda flexible, por ejemplo, cuando se utiliza con almacenamiento de energía térmica.

Anexo 6

La mayor parte del calor a alta temperatura requerido en la industria se destina al acero, los productos químicos y el cemento.

Consumo energético final mundial por sector industrial, 1 2022, exajulios



¹ Excluye ~18 EJ del consumo energético final con información insuficiente; excluye la agricultura y la silvicultura (~5 EJ). En todas las industrias, el consumo energético industrial se clasifica según los requisitos de temperatura, tanto para la energía térmica como para la mecánica. El calor de alta temperatura sustenta procesos como la fundición y las reacciones químicas; el calor de temperatura media se utiliza en el secado y otros procesos de temperatura moderada, y a menudo para satisfacer las demandas de energía mecánica; y el calor de baja temperatura se aplica para el precalentamiento o el mantenimiento de condiciones específicas. Las demandas de energía mecánica, como el trabajo de compresión, suelen satisfacerse mediante turbinas de vapor o motores eléctricos.

² Incluye agua caliente y calefacción.

³ También incluye cerámica y vidrio.

La producción de aluminio requiere temperaturas superiores a los 1000 °C. Sin embargo, a diferencia de los cuatro grandes materiales industriales, la mayor parte de esta demanda energética a alta temperatura ya se satisface mediante electricidad.

⁵ Incluye las industrias de petróleo y gas, construcción, minería y pesca.

Fuente: Análisis de McKinsey Energy Solutions y McKinsey Global Institute

7

Las nuevas tecnologías de bajas emisiones deben ser viables cuando se presenten oportunidades para renovar activos.

La industria siderúrgica mundial produce alrededor de 1.800 millones de toneladas de acero cada año, suficiente para construir el equivalente a 24.000 puentes Golden Gate.²⁶ En la actualidad, hay más de 1.400 altos hornos de alta emisión en funcionamiento en todo el mundo.²⁷

Las siderúrgicas que buscan descarbonizarse se enfrentan a decisiones difíciles y a decisiones delicadas sobre el tiempo. La mayor parte del acero actual se produce mediante el proceso de alto horno con horno de oxígeno básico. Este proceso utiliza carbón de coque para separar el oxígeno del óxido de hierro del mineral de hierro y convertirlo en arrabio.

Antes de convertir ese arrabio en acero. De aquí a 2030, se prevé que alrededor del 60 % de los altos hornos del mundo sean revestidos, es decir, su interior.

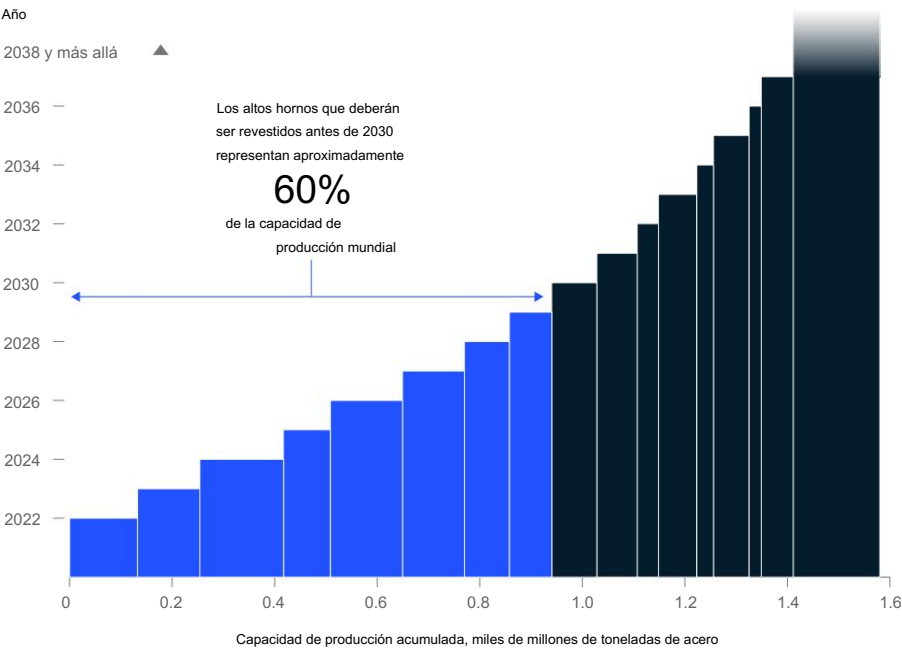
Revestimientos reemplazados o renovados (Gráfico 7). Este reenvasado suele realizarse cada diez a veinte años.^{²⁸} Este es un proceso considerablemente intensivo en capital, y las decisiones que toman las acereras son cruciales para la transición. Durante este periodo, podrían proceder con el reenvasado o la sustitución de los altos hornos por alternativas de bajas emisiones.

El desafío radica en que algunos de los enfoques alternativos clave que se están explorando, como la reducción directa basada en hidrógeno combinada con hornos de arco eléctrico, no están comercialmente disponibles ni son competitivos en términos de costos. Además, implementar estas alternativas requiere inversiones iniciales de capital y las capacidades adecuadas para su instalación. A menos que estas alternativas estén disponibles, sean viables y tengan un costo razonable, existe el riesgo de que se cierre la ventana de reenvasado y los activos de altas emisiones queden bloqueados durante más años.

Anexo 7

Se acerca una ventana de renovación para los altos hornos, ya que alrededor del 60% de la capacidad requerirá revestimiento para 2030.

La capacidad de producción acumulada de altos hornos a nivel mundial deberá ser revestida para el año 1



¹ Basado en la vida de la campaña (es decir, la vida útil históricamente observada del equipo entre reinversiones importantes). Fuente: Vogl, Olsson y Nykvist (2021); Análisis del Instituto Global McKinsey

8

La captura de carbono tiene un gran potencial, pero es un desafío en algunos casos de uso.

Una opción para reducir las emisiones de activos de altas emisiones que aún tienen vidas útiles prolongadas es, en lugar de retirarlos prematuramente, modernizarlos para incluir tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS).

La CCUS existe desde hace décadas, pero es

Se utiliza ampliamente donde los flujos de CO₂ están muy concentrados y, por lo tanto, el CO₂ es más fácil de digerir. capturar, como es el caso del procesamiento de gas natural o la producción de etanol.

Sin embargo, la mayoría de las emisiones actuales vienen con CO₂ en concentraciones relativamente bajas, por ejemplo

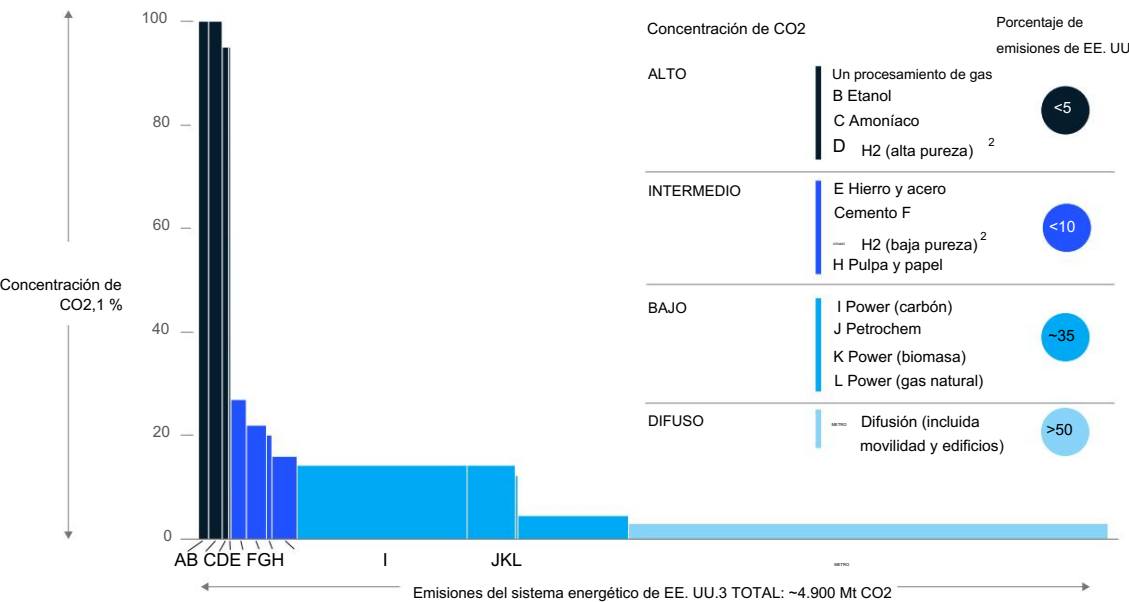
En la producción de cemento y las centrales eléctricas de gas natural, la captura de CO₂ es más difícil y menos eficiente en estos casos. Para que la CCUS alcance su máximo potencial, sería necesario llegar a estos nuevos procesos más complejos. El uso de la CCUS en dichos procesos podría ser de tres a cuatro veces más costoso que en los casos de uso actuales (Gráfico 8). Esto se debe a que se requeriría más energía y equipos, y se necesitarían nuevas tecnologías para capturar CO₂ de manera efectiva en bajas concentraciones. Mejorar el rendimiento y reducir el costo asociado con las tecnologías de captura es fundamental para llegar a estos casos de uso más complejos y de baja concentración.²⁹ Y, por supuesto, una vez capturado, el CO₂ tendría que transportarse y utilizarse o almacenarse. Se requeriría una mayor capacidad de almacenamiento. Mejorar la viabilidad comercial de nuevos casos de uso para el CO₂ capturado también ayudaría, por ejemplo, a la producción de combustibles sintéticos.

La mayoría de las emisiones actuales son de CO₂ en concentraciones relativamente bajas. La captura de CO₂ es más difícil y menos eficiente en estos casos. Para que la CCUS alcance su máximo potencial, necesitaría alcanzar estos nuevos procesos más complejos.

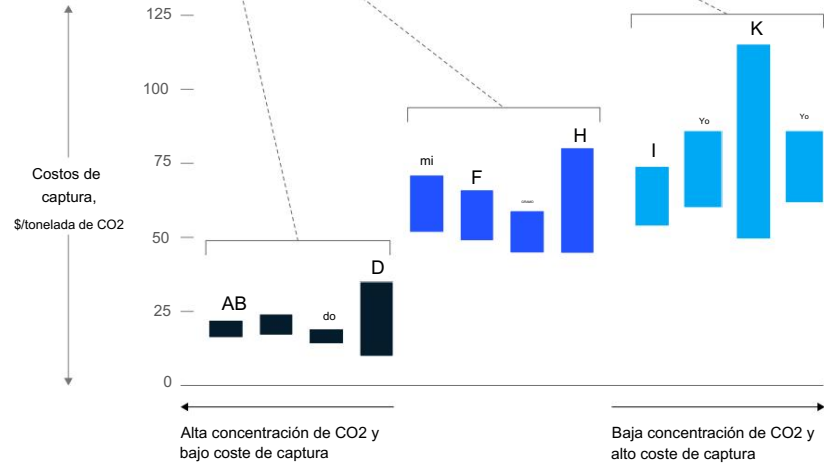
Anexo 8

La mayoría de las emisiones surgen de procesos con baja concentración de CO2, donde la captura, utilización y almacenamiento de carbono es más difícil y más costoso de implementar.

Una gran parte de las emisiones proviene de procesos con menores concentraciones de CO2...



... y la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) se vuelve más costosa en concentraciones más bajas



¹ La concentración de CO2 se refiere al grado de concentración de CO2 en el gas de escape, también asociado con el nivel de pureza. Una alta pureza se refiere a una alta concentración de CO2. Tenga en cuenta que todos los valores son promedios solo para EE. UU.

² Las emisiones de hidrógeno pueden variar desde corrientes aisladas de alta pureza (menor costo) hasta corrientes combinadas de menor pureza (mayor costo).

³ A nivel mundial, la combinación de emisiones difiere de la de Estados Unidos.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.; Instituto Global CCS; Consejo Nacional del Petróleo; Santos et al. (2021); Lagnholtz et al. (2020); Laboratorio Nacional de Tecnología Energética; Administración de Información Energética de EE. UU.; Análisis del McKinsey Global Institute.

9

El hidrógeno también podría desempeñar un papel importante, pero sus características distintivas deben equilibrarse con los desafíos de eficiencia.

Al igual que la CCUS, el hidrógeno tiene muchas características distintivas y potencialmente puede desempeñar un papel importante en todo el sistema energético como complemento a la electrificación.

Las propiedades físicas del hidrógeno podrían convertirlo en un herramienta flexible en los esfuerzos de descarbonización. Puede ser

Se utiliza como materia prima en numerosos procesos industriales, como la fabricación de acero y productos químicos, o como fuente de calor de alta temperatura que requieren algunos procesos. El hidrógeno también puede ser un portador de energía eficaz. Presenta una alta densidad energética (gravimétrica) (por unidad de peso), lo que podría ser importante para el transporte a larga distancia o el almacenamiento de energía de larga duración.

Pero habría que afrontar una dificultad importante:

El uso de hidrógeno generalmente implica muchas conversiones.

pasos y se pierde energía en cada etapa del recorrido que realiza la molécula de hidrógeno.

En general, se puede perder entre el 40 % y el 75 % de la energía cuando se utiliza hidrógeno en aplicaciones de energía, calefacción industrial o movilidad. Por ejemplo, si se utiliza hidrógeno en un vehículo eléctrico de pila de combustible (VEC), solo entre el 25 % y el 35 % de la energía disponible originalmente en forma de electricidad para producir la molécula de hidrógeno se convierte en el motor del vehículo. En comparación, un VEC puede tener una eficiencia energética del 80 % al 90 %, o hasta el cuádruple de la de un VCCE impulsado por hidrógeno (Gráfico 9).

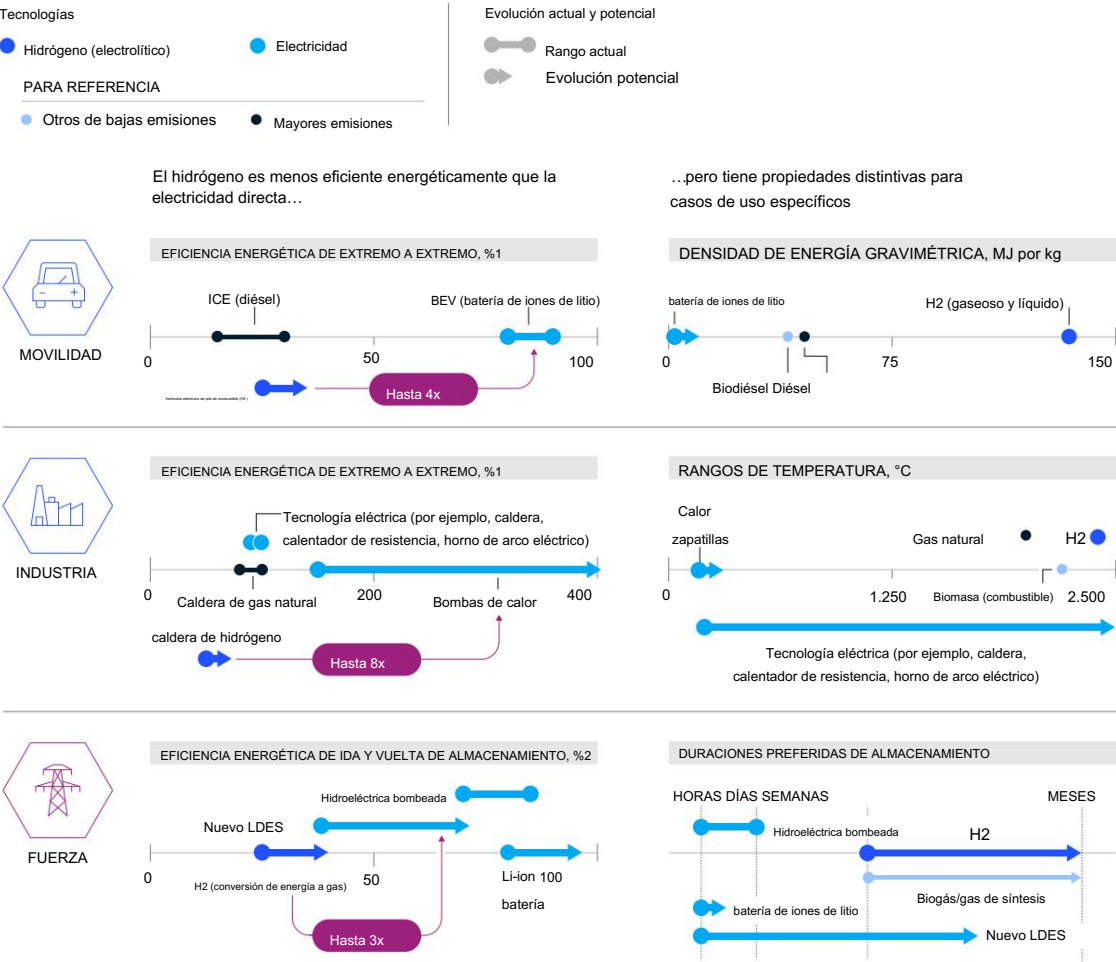
Para que el uso del hidrógeno sea una realidad, es necesario minimizar las pérdidas de energía. Las opciones incluyen la innovación en nuevos modelos de electrolizadores y nuevas configuraciones de producción y transporte. Por ejemplo, podría ser más eficaz transportar productos intermedios derivados del hidrógeno, como el hierro briquetado en caliente, que el propio hidrógeno. En términos más generales, es importante considerar el uso estratégico del hidrógeno.

El hidrógeno podría considerarse, en particular, en los casos en que sus propiedades beneficiosas sean más evidentes y donde existan otras alternativas de bajas emisiones. son menos factibles.

El uso de hidrógeno generalmente implica muchos pasos de conversión y se pierde energía en cada etapa del recorrido que realiza la molécula de hidrógeno.

Anexo 9

A pesar de ser menos eficiente que la electricidad directa, el hidrógeno tiene características distintivas para un conjunto de casos de uso específicos.



Nota: Los cálculos de eficiencia asumen hidrógeno electrolítico producido mediante electrólisis de agua alcalina/electrólisis de membrana de intercambio de protones, y transportado solo a corta distancia (el escenario más común). Las eficiencias mostradas parten del punto de vista de la energía final; en el caso del hidrógeno, de la energía utilizada para producirlo. De esta manera, las eficiencias entre los casos de uso del hidrógeno y la electricidad son directamente comparables, ya que comparten el mismo punto de partida (electricidad). Otros casos (combustibles fósiles o biomasa) implican otras formas de energía final y, por lo tanto, no son directamente comparables y se muestran solo como referencia.

¹ En movilidad e industria, todos los casos de hidrógeno y electricidad consideran la eficiencia de la electricidad para la realización de trabajo útil (movimiento y calor, respectivamente).

² Eficiencia al almacenar energía y convertirla nuevamente en energía.

Fuente: Consejo de Almacenamiento de Energía de Larga Duración (LDES); Fraunhofer ISI; Departamento de Energía de EE. UU.; Laboratorio Nacional de Energías Renovables; Agencia Internacional de Energía; Comisión de Transiciones Energéticas; Consejo del Hidrógeno; Consejo Internacional de Transporte Limpio; Coalición Científica del Hidrógeno; Agora Industry; Pashchenko (2024); Análisis del McKinsey Global Institute.

10

Las tecnologías de bajas emisiones requerirían que la capacidad crítica de extracción y refinación de minerales se amplíe sustancialmente.

Muchas tecnologías de bajas emisiones dependen de minerales críticos, desde el litio para baterías hasta tierras raras para turbinas eólicas y vehículos eléctricos.³¹

Para que la transición energética avance a buen ritmo y se implementen más tecnologías limpias, la demanda y la oferta de minerales críticos tendrían que aumentar sustancialmente, especialmente hasta 2030 según el escenario de Compromisos Cumplidos para 2023 de McKinsey. La demanda de níquel podría duplicarse, la de disprosio y terbio, cuadruplicarse, y la de litio, se septuplicar (Gráfico 10).

Hay suficientes reservas para satisfacer la demanda prevista, pero a menudo se necesitan muchos años (a veces más de una década) para que se genere un suministro adicional.³² Las proyecciones actuales de suministro basadas en

Los proyectos anunciados no serían suficientes para satisfacer la demanda de la transición, en particular hasta 2030. Satisfacer la creciente demanda es aún más complejo cuando el origen y el procesamiento de un mineral se concentran geográficamente en un número limitado de economías. Muchos de los minerales críticos necesarios para la transición energética, como el cobalto, el litio, el grafito natural, el níquel y las tierras raras, dependen de las tres mayores economías proveedoras para más del 50 % de su extracción, y en algunos casos, más del 80 %.

El refinado es aún más concentrado.

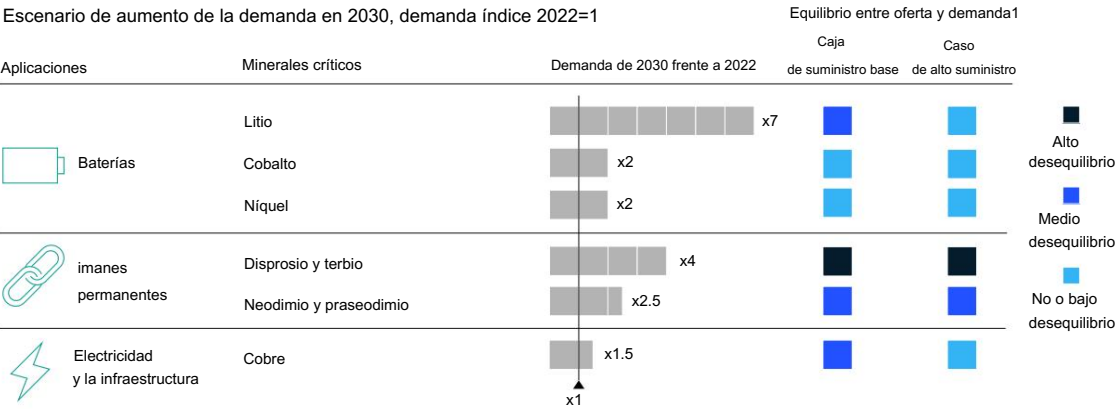
Algunos enfoques podrían permitir un aumento más rápido del suministro. Las nuevas tecnologías de extracción, los métodos de prospección y la construcción modular están acelerando los plazos de entrega. Por supuesto, existe otra opción: reducir la demanda de estos minerales tan codiciados. Podría haber más reciclaje para extraerlos y reutilizarlos. Y podrían evitarse por completo. Por ejemplo, los motores sin tierras raras podrían pasar de representar menos del 10 % del suministro total a constituir la mayor parte del nuevo suministro para 2030.

Para que la transición energética avance a buen ritmo y se implementen más tecnologías limpias, la demanda y la oferta de minerales críticos tendrían que aumentar sustancialmente.

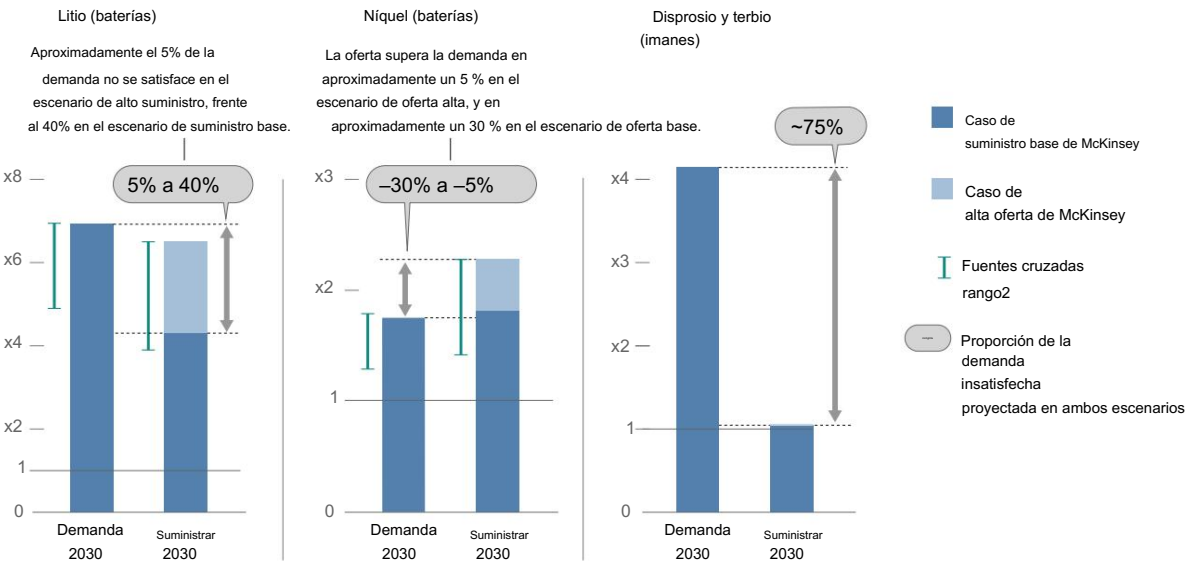
Anexo 10

Se espera que la demanda de minerales críticos crezca hasta siete veces, con el riesgo de que se produzcan desequilibrios entre la oferta y la demanda.

ESCENARIO DE COMPROMISOS CUMPLIDOS DE MCKINSEY 2023



Demanda y oferta 2030, índice de demanda 2022=1



¹El caso base de suministro de McKinsey MineSpans incluye todas las minas en operación (corregido por agotamiento y cierre esperado cuando sea relevante), y una selección de proyectos actualmente en construcción o en la etapa de factibilidad, y en la mayoría de los casos con financiación confirmada. El caso alto de suministro incluye, por ejemplo, algunos proyectos en etapa de factibilidad sin financiación confirmada, con ajustes por posibles retrasos. Tenga en cuenta que alcanzar este caso alto de suministro no está en absoluto garantizado, y dependería de que se cumplan muchas condiciones, incluyendo la financiación requerida y la ejecución concurrente de múltiples proyectos en paralelo, lo que históricamente no siempre ha sido el caso. Los posibles desequilibrios entre la demanda requerida y la oferta proyectada se clasifican en tres categorías. "Desequilibrio alto" corresponde a los casos en los que la demanda es más del 50% superior a la oferta proyectada. "Desequilibrio medio" corresponde a los casos en los que la demanda es más del 10% superior a la oferta, pero menos del 50%. "Desequilibrio nulo o bajo" corresponde a los casos en los que la demanda es menos del 10% superior o incluso inferior a la oferta.

²Se obtiene de McKinsey y otras fuentes externas.

Fuente: McKinsey MineSpans; Agencia Internacional de Energía; Comisión de Transiciones Energéticas; análisis del McKinsey Global Institute

Abordar la transición energética implicaría una transformación física compleja

Este artículo destaca diez realidades físicas de la transición energética. Forman parte de una transformación física altamente compleja que deberá llevarse a cabo para alcanzar el éxito. En nuestro informe de agosto de 2024, identificamos 25 desafíos físicos en todo el sistema energético que deberán superarse para que la transición tenga éxito (Gráfico 11).

Algunos de los 25 son más difíciles de abordar que otros.

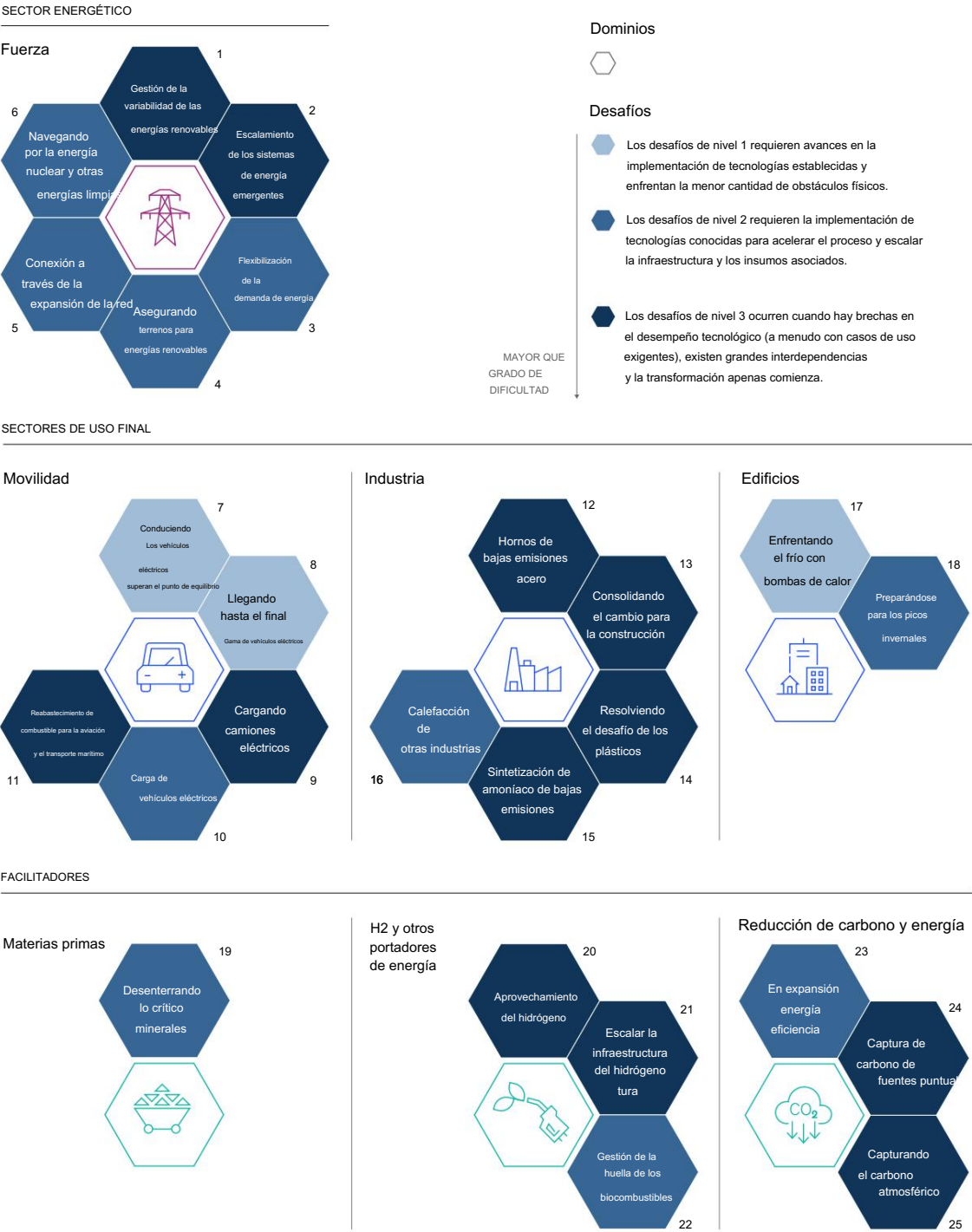
Clasificamos los 25 desafíos físicos en tres niveles de dificultad según las brechas de rendimiento tecnológico, las interdependencias con diferentes desafíos y las necesidades de escalabilidad. Casi la mitad (12 de los 25) corresponden a lo que describimos como desafíos de Nivel 3.

Estos son desafíos particularmente difíciles de abordar. Sin embargo, reducir aproximadamente la mitad del CO₂ relacionado con la energía...

Las emisiones dependen de abordarlas.

Anexo 11

Para que la transición energética tenga éxito se deberán abordar veinticinco desafíos físicos.



Para explorar los 25 desafíos y lo que se necesitaría para enfrentarlos, consulte nuestro [informe completo](#).

Acerca de los autores

[Mekala Krishnan](#) es socio de MGI en Boston. [Chris Bradley](#) es socio principal de McKinsey y director de MGI en Sídney.

[Humayun Tai](#) Tiago Devesa es socio principal y colíder de la Práctica Global de Energía y Materiales de McKinsey en Nueva York. es investigador senior del MGI en Lisboa.

Este artículo fue editado por la editora ejecutiva de MGI, Janet Bush, con visualizaciones de datos de Juan M. Velasco.

Expresiones de gratitud

Agradecemos a Sven Smit, socio sénior de McKinsey y presidente de MGI en Ámsterdam, y a Daniel Pacthod, socio sénior de McKinsey en Nueva York, quienes fueron coautores del informe completo en el que se basa este artículo. En ese informe, un grupo de colegas de McKinsey coescribió capítulos dedicados a los siete dominios del sistema energético: para energía, Jesse Noffsinger, socio de McKinsey en Seattle, y Diego Hernández Díaz, socio de McKinsey en Ginebra; para movilidad, Timo Möller, socio de McKinsey en Colonia y colíder del Centro McKinsey para la Movilidad Futura; para industria, Michel Van Hoey, socio sénior de McKinsey en Luxemburgo; Christian Hoffmann, socio de McKinsey en Düsseldorf; Ken Somers, socio de McKinsey en Bruselas; y Adam Youngman, líder sénior de activos de McKinsey en Los Ángeles; para edificios, Daniel Cramer, líder sénior de activos de McKinsey en Ámsterdam; para materias primas, Michel Foucart, socio asociado de McKinsey en Bruselas; Michel Van Hoey; y Patricia Bingoto, experta senior de McKinsey en Zúrich; para hidrógeno y otros portadores de energía, Rory Clune, socio senior de McKinsey en Boston; y para reducciones de carbono y energía, Clint Wood, socio de McKinsey en Houston, y Santhosh Shankar, experto de McKinsey con sede en Estados Unidos (ex alumno).

El equipo de investigación estuvo dirigido por Masud Ally, Francisco Galtieri, Kasmet Niyongabo y Luc Oster-Pecqueur, y estuvo compuesto por Kemi Ajala, Sanjana Are, Maya Berlinger (exalumna), Andrea Boza Zanatta, Susan Cheboror (exalumna), Patrick Chen, Suhayl Chettih, Thibault Courqueux, Anurag Dash (exalumno), John Grabda, Marco Groth, Marcin Hajlasz, Muriel Jacques, Myer Johnson-Potter (ex alumno), Pauline Leeuwenburg, Michiel Nivard, Pierre Salvador, Anna Schneider, Giulio Scopacasa, Girish Selvaraj (ex alumno), Casey Timmons, Tse Uwejamomere, Geert Vergoossen, Marnix Verhoeven (ex alumno) y David Wu (ex alumno). Para obtener una lista completa de contribuyentes, consulte nuestro informe completo.

Del equipo de operaciones de MGI, agradecemos a Rachel Robinson y Rishabh Chaturvedi. A David Batcheck, por su ayuda con la producción digital; y a Nienke Beuwer y Rebeca Robboy, por su experiencia en comunicación. También agradecemos a Diane Rice, del equipo de diseño de McKinsey.

Notas finales

1 Lo difícil: navegar por lo físico Realidades de la transición energética, McKinsey Global Institute, 14 de agosto de 2024.	9 Clemens Forman et al., "Estimación de la potencial de calor residual global", Renewable and Sustainable Energy Reviews, volumen 57, mayo de 2016; Diagramas de flujo de energía: trazando las complejas relaciones entre energía, agua y carbono, Diagramas de flujo, Laboratorio Nacional Lawrence Livermore y Departamento de Energía, consultado en julio de 2024; y Paul Martin, La falacia de la energía primaria, o ¡NO cometes el segundo pecado de la termodinámica! Junio de 2024.	2025; Perspectivas globales de vehículos eléctricos 2024, Agencia Internacional de la Energía, abril de 2024; y datos de EV Volumes (2024). Cabe destacar que todas las ventas de vehículos eléctricos de pasajeros de 2010 a 2024 (incluidos solo los automóviles) se contabilizan en el cálculo de cómo En los últimos cinco años se produjeron muchas ventas de vehículos eléctricos de pasajeros.
2 Estadísticas de energía renovable 2024, Agencia Internacional de Energías Renovables, julio de 2024; Lauren Holtmeier, «La capacidad mundial de energías renovables aumentó hasta un nuevo récord en 2024, afirma el director de IRENA», S&P Global, 12 de enero de 2025; Euan Graham y Nic Fulghum, «La energía solar continúa aumentando en 2024», Ember Institute, septiembre de 2024; «Perspectivas globales de vehículos eléctricos para 2024», Agencia Internacional de la Energía, abril de 2024; y datos de EV Volumes (2024).	10 Base de datos McKinsey EMIT, 2023. 11 Véase Simon Michaux, Assessment of the Se requiere capacidad adicional de los sistemas de energía eléctrica de energía alternativa para reemplazar completamente los combustibles fósiles, Servicio Geológico de Finlandia, agosto de 2021.	14 Véase también, "La transición energética: ¿dónde estamos realmente?", McKinsey, agosto de 2024. 15 Perspectiva energética global 2023, McKinsey, Octubre de 2023. 16 Perspectivas de la tecnología energética 2023, Agencia Internacional de Energía, enero de 2023; y Redes eléctricas y transiciones energéticas seguras, Agencia Internacional de Energía, octubre de 2023.
3 Tom Randall, "El auge de los vehículos eléctricos de largo alcance ha llegado", Bloomberg, 6 de marzo de 2024; Beatriz Santos, "Fabricante estadounidense lanza bomba de calor para climas fríos", PV Magazine, 18 de abril de 2023; y ¿ Por qué usar una bomba de calor de aire para climas fríos? Gobierno de Canadá, consultado en abril de 2024. El almacenamiento estacionario incluye sistemas no móviles que se utilizan típicamente para almacenar energía para aplicaciones de red, incluyendo sistemas como instalaciones de baterías a escala de red, sistemas de almacenamiento de energía domésticos y otras aplicaciones donde la energía almacenada puede utilizarse para equilibrar la oferta y la demanda, proporcionar energía de respaldo y mejorar la estabilidad de la red.	12 Este escenario define el progreso logrado hasta la fecha y la magnitud de la transformación necesaria, con detalles sobre las diferentes economías y tipos de activos acerca de los niveles de implementación que serían necesarios para que esas economías cumplan con los objetivos climáticos. compromisos que han asumido (a finales de 2022). Este escenario supone que los países que se han comprometido con cero emisiones netas (algunos para 2050, otros más tarde) cumplir con esos compromisos y que el calentamiento alcance 1,6 °C con respecto a los niveles preindustriales para 2100. Véase Perspectiva energética global 2023, McKinsey, octubre de 2023. Este escenario (y, en algunos casos, otros similares) se utiliza aquí no como una proyección, sino para comprender el progreso hasta la fecha en la transición y los desafíos físicos que hay que superar. Otros escenarios de cero emisiones netas pueden contener combinaciones ligeramente diferentes de tecnologías y ritmos de implementación, pero las tendencias y temas generales descritos en esta investigación... Seguiría vigente. Este informe se basa en un análisis a septiembre de 2023. La evolución posterior del sistema energético podría generar resultados diferentes, que se abordarán en próximas investigaciones de McKinsey.	17 Las emisiones totales de CO2 de los edificios son Se asigna de la siguiente manera: 54 % para calefacción, 22 % para agua caliente, 9 % para electrodomésticos, 8 % para refrigeración, 5 % para iluminación y 2 % para cocina. Véase Brodie Boland, Shailesh Lekhwani, Sebastian Reiter y Erik Sjödin, «Building value by decarbonizing the built environment», McKinsey, junio de 2023.
4 "Récord negativo de precios de la energía en Europa y otras noticias importantes sobre energía", Foro Económico Mundial, 23 de septiembre de 2024.		18 Michael Waite y Vijay Modi, "Implicaciones de la carga eléctrica en las vías de descarbonización de la calefacción de espacios", Joule, volumen 4, número 2, 2020.
5 En cola: edición 2024, Características de las centrales eléctricas que buscan interconexión de transmisión a finales de 2023, Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, Abril de 2024; y "El Departamento de Energía lanza una nueva iniciativa del Comité Bipartidista del Presidente Biden Ley de Infraestructura para modernizar el sistema nacional red eléctrica", Departamento de Energía de EE. UU., 12 de enero de 2022.		19 Michael Waite y Vijay Modi, "Implicaciones de la carga eléctrica en las vías de descarbonización de la calefacción de espacios", Joule, volumen 4, número 2, 2020. Este escenario supone que todas las demás fuentes de demanda se mantienen constantes y que no se requieren medidas adicionales para Se establece un equilibrio entre la oferta y la demanda.
6 Lo difícil: navegar por lo físico Realidades de la transición energética, McKinsey Global Institute, 14 de agosto de 2024.	13 Estadísticas de energía renovable 2024, Agencia Internacional de Energías Renovables, julio 2024; Lauren Holtmeier, "La capacidad mundial de energías renovables aumentó hasta alcanzar un nuevo récord en 2024, dice el jefe de IRENA", S&P Global, 12 de enero de	20 Duncan Gibb et al., "Entrando desde el frío: eficiencia de la bomba de calor a bajas temperaturas", Joule, volumen 7, número 9, septiembre de 2023. La eficiencia de una bomba de calor se mide mediante el coeficiente de rendimiento (COP), que suele oscilar entre dos y cinco para las bombas de calor, lo que significa que por cada unidad de energía eléctrica consumida, la bomba de calor puede proporcionar de dos a cinco unidades de calor. Para mayor contexto, consulte Understanding COP: Coefficient of performance of heat pumps, Learn Metrics, consultado en mayo de 2024.
7 Gas natural licuado: comprensión de los hechos básicos, Departamento de Energía de EE. UU., 2005. 8 Flexibilidad en las centrales térmicas: con el foco puesto en las centrales eléctricas de carbón existentes, Agora Energiewende, junio de 2017.		

21 Soluciones del lado de la demanda para los picos y limitaciones invernales, ACEEE, 15 de abril de 2021.

Las medidas del lado de la demanda incluyen, por ejemplo, mejoras en la envoltura térmica, control térmico inteligente, eliminación de carga para acondicionamiento de espacios y calentadores de agua conectados.

El modelo GREET de I+D (Software v1.3.0.13991) , desarrollado por el Laboratorio Nacional de Argonne, se utilizó para determinar las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂-e) de fabricación de vehículos y las emisiones de CO₂-e del pozo al surtidor de los vehículos de combustión interna.

Los datos de entrada para las emisiones de CO₂-e del tubo de escape de los vehículos se ajustaron utilizando datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente y del Departamento de Energía de EE. UU. Los vehículos eléctricos de batería (VEB) no tienen emisiones directas del tubo de escape ni del pozo al surtidor. Su impacto se mide por las emisiones de la red eléctrica, conocidas como intensidad de red.

Los datos de intensidad de emisiones de 2022 provienen del informe Climate Transparency 2022, Climate Transparency, octubre de 2022. Las proyecciones de intensidad de la red futura provienen de Global energy perspective 2023, McKinsey, octubre de 2023. El Centro McKinsey para la Movilidad Futura rastrea las emisiones de fabricación asociadas con los vehículos eléctricos de batería.

23 Perspectiva energética global 2023, McKinsey, Octubre de 2023.

24 Vaclav Smil, "El mundo moderno no puede existir sin estos cuatro ingredientes. Todos ellos

requieren combustibles fósiles", Time, 12 de mayo de 2022; y Perspectiva energética global 2023, McKinsey, octubre de 2023.

En todas las industrias, el consumo energético industrial se clasifica según los requisitos de temperatura, tanto para la energía térmica como para la mecánica. El calor de alta temperatura sustenta procesos como la fundición y las reacciones químicas; el calor de temperatura media se utiliza en el secado y otros procesos de temperatura moderada, y a menudo para cubrir las demandas de energía mecánica; y el calor de baja temperatura se aplica para el precalentamiento o el mantenimiento de condiciones específicas. Las demandas de energía mecánica, como el trabajo de compresión, suelen cubrirse mediante turbinas de vapor o motores eléctricos.

²⁶ Instituto de Materiales Básicos McKinsey; "Datos rápidos sobre el puente Golden Gate", CNN, 19 de julio de 2023.

27 Rastreador global de altos hornos, Global Energy Monitor, consultado en mayo de 2024.

28 Valentin Vogl, Olle Olsson y Björn Nykvist, "Eliminación gradual del alto horno para cumplir los objetivos climáticos globales", Joule, volumen 5, número 10, 2021.

29 "El mundo necesita capturar, usar y almacenar gigatoneladas de CO₂: ¿Dónde y cómo?", McKinsey, abril de 2023; y "Ampliación de la industria de CCUS para lograr emisiones netas cero", McKinsey, octubre de 2022.

30 Esto se basa en el análisis de la eficiencia integral, comenzando desde el punto de vista de la energía final. La eficiencia de las diferentes tecnologías se basa en Hydrogen Insights (McKinsey y el Consejo del Hidrógeno, 2023); Net-zero heat: Long-duration energy storage to accelerate energy system decarbonization (McKinsey y el Consejo LDES, 2022); y Net-zero power: Long-duration energy storage for a renewable grid (McKinsey y el Consejo LDES, 2022).

31 La transición a materiales de cero emisiones netas: Implicaciones para las cadenas de suministro globales, McKinsey, 5 de julio de 2023.

32 Requisitos de materiales y recursos para la transición energética, Comisión de Transiciones Energéticas, julio de 2023.

33 Perspectivas mundiales de minerales críticos 2024, Agencia Internacional de Energía, mayo de 2024; y Global Materials Perspective 2024, McKinsey, septiembre de 2024.

34 La transición a materiales de cero emisiones netas: Implicaciones para las cadenas de suministro globales, McKinsey, 5 de julio de 2023.