



La transición energética en las industrias de difícil descarbonización

- Caracterización de las industrias de difícil descarbonización

- Políticas para avanzar en la descarbonización

- Oportunidades para el desarrollo de América Latina y el Caribe

- Tecnologías para la transición energética



Mensajes clave

1

Las industrias del cemento, el acero y los productos químicos enfrentan desafíos significativos para descarbonizarse debido a su intensivo uso de los combustibles fósiles y las emisiones inherentes al proceso productivo.

A pesar de estos desafíos, estas industrias son vitales para la economía, proporcionando insumos clave para la construcción, el transporte, la agricultura y una variedad de productos cotidianos elaborados con plástico.

2

América Latina y el Caribe tiene un potencial significativo para el desarrollo de las industrias verdes, dada la abundancia de sus recursos naturales y las posibilidades que tiene para generar energía limpia de fuentes renovables. Para materializar ese potencial, será necesario seguir impulsando los proyectos de hidrógeno verde, un insumo clave para las industrias con un uso intensivo de la energía, que podría ser usado como combustible.

3

La región puede convertirse en pocos años en un exportador neto de acero producido con hidrógeno verde, explotando la emergencia de mercados como el automotriz, que tienen metas de “cero emisiones” en el corto y mediano plazo. Además, deberá aprovechar el desarrollo de la industria del hidrógeno para la producción de fertilizantes y plásticos con bajas emisiones netas.

4

Dada la complejidad de la descarbonización de estas industrias, serán necesarias soluciones del lado de la demanda. Ejemplos claros de esto son las mejoras de eficiencia en el uso del concreto, la mayor recuperación de chatarra del acero, el uso eficiente de los fertilizantes y, especialmente, la aplicación de los principios de circularidad en el uso y producción de plástico.

5

La prioridad a corto y mediano plazo para América Latina y el Caribe no debe ser la carbononeutralidad, sino aprovechar nuevas tecnologías y mercados para mejorar la productividad y posicionarse en segmentos que ofrezcan primas por bajos niveles de carbono.

6

En la industria cementera, se deberá comenzar reemplazando el carbón por biomasa en la medida de lo posible, aprovechando la abundancia de este recurso en la región.

7

El gas natural será clave en la industria del amoníaco, junto con el hidrógeno verde, permitiendo a la región beneficiarse de su riqueza en este recurso.

8

Tanto estas industrias como las de menor uso energético reducirán significativamente sus emisiones siempre que se continúe avanzando en la generación eléctrica con recursos renovables y en la electrificación de los procesos que utilizan combustibles fósiles.

9

La captura de carbono ganará importancia en el mediano y largo plazo a medida que la tecnología madure y sus costos disminuyan. En este sentido, la región también cuenta con potenciales de desarrollo, dado que el carbono capturado puede ser reutilizado en la producción de amoníaco o plásticos, reinyectado en yacimientos agotados o para la recuperación mejorada de petróleo.

La transición energética en las industrias de difícil descarbonización¹

Introducción

El sector industrial genera el 11 % de las emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) y el 24 % de las emisiones energéticas de América Latina y el Caribe (ALyC). Al desagregar los datos por subregiones, se observa que estos valores se mantienen en el caso de América Latina, mientras que en el Caribe la industria representa el 25 % de las emisiones directas y el 28 % de las emisiones energéticas (Minx et al., 2021)². Ese mayor porcentaje se explica en parte por las altas emisiones de la industria de Trinidad y Tobago, la cual es intensiva en la extracción y uso de combustibles fósiles. Dentro de la industria, solo tres subsectores representan el 57 % de esas emisiones directas: la industria acerera, la cementera y la química (Minx et al., 2021).

Además de tener elevadas emisiones, estos tres subsectores tienen tres características que las destacan:

- Son industrias esenciales para las economías modernas. El cemento es primordial para la construcción; el acero, para diversas industrias, como la construcción y el transporte; y los productos químicos, para la agricultura y la industria del plástico, entre otros.
- Tienen altas intensidades de carbono. Esta característica se explica sobre todo por su alta intensidad energética, ya que tradicionalmente utiliza combustibles fósiles como insumo principal en el proceso productivo.
- Cuentan con limitadas alternativas actualmente viables que les permita descarbonizar sus procesos productivos en el corto plazo.

¹ Este capítulo fue elaborado por Juan Odriozola con la asistencia de investigación de Franco Degiuseppe.

² En el apéndice del capítulo, disponible en línea, se pueden ver los países que Minx et al. (2021) consideran en cada subregión.



El 11 % de las emisiones directas de gases de efecto invernadero y el 24 % de las emisiones energéticas de América Latina y el Caribe son generadas por el sector industrial

Las industrias no intensivas en el uso energético se caracterizan esencialmente por sus necesidades bajas o medias en cuanto a las temperaturas necesarias para sus procesos productivos. Dentro de estas industrias se destaca primero el procesamiento de alimentos, seguido por la minería. La demanda de energía de estos sectores es, en general, de electricidad o combustibles fósiles para motores o maquinarias para procesamiento y representa cerca de la mitad de la demanda energética del sector industrial en la región. Por lo tanto, los estándares de eficiencia para motores, la electrificación de procesos, la adopción de bombas térmicas, el uso de biocombustibles o la autogeneración de energía son acciones que permiten una eficiente descarbonización y que pueden emprender las empresas de estos sectores. La descarbonización de la red eléctrica de los países tendría, por su parte, un impacto directo en estas industrias, que cobraría mayor importancia en la medida que estos sectores comiencen a electrificar sus procesos (AIE, 2023).

Las economías de América Latina y el Caribe se han vuelto menos complejas con el paso del tiempo. Esta menor complejidad se traduce en una menor intensidad energética respecto al promedio global. Por ejemplo, los combustibles fósiles para procesos que requieren altas temperaturas representan el 50 % del

uso energético en la industria de la región, significativamente menos que el promedio global, siendo este cercano al 65 %.

Se pueden destacar dos barreras principales para una rápida transición energética en la industria de esta región. La primera es el alto costo del capital, el cual, en Brasil y México, por ejemplo, fue de dos a tres veces más alto en 2021 que en China, Europa y Estados Unidos. La segunda barrera se encuentra directamente relacionada con la anterior. Los costos de financiamiento para las economías de América Latina y el Caribe son relativamente altos, un problema asociado en parte a la inestabilidad de sus economías. Por ejemplo, los rendimientos de los bonos soberanos brasileños en reales superaron el 12 % en 2023 y los mexicanos, casi el 9 %, siendo dos o tres veces más altos que los rendimientos en Estados Unidos y los países europeos. A su vez, el desarrollo de los sistemas financieros domésticos en América Latina y el Caribe es bajo (AIE, 2023).

Este capítulo describe las características más importantes de las industrias que enfrentan mayores barreras para una transición energética, sus patrones de emisiones y las alternativas viables de descarbonización, con mayor foco en la transición energética. También se centra en los aspectos técnicos y en las políticas específicas que atañen a estas industrias, por lo que no se discutirán políticas de orden transversal, como serían los precios al carbono, dado que su discusión excede el alcance del capítulo. En este, se describen las características de los sectores intensivos en el uso energético, analizando con detenimiento cada uno de ellos: la industria del cemento, la industria del acero y la industria química y petroquímica.

Caracterización de los sectores intensivos en el uso de energía

Las industrias que hacen un uso intensivo de la energía representan el 13 % de las emisiones energéticas y el 6 % de las emisiones directas de América Latina y el Caribe. Si se observa cada subregión por separado, las emisiones directas de industrias intensivas en energía de América Latina están en torno del 6 % del total de sus emisiones, mientras que las

del Caribe son cercanas al 12 % (Minx et al., 2021). Otras fuentes que consideran las emisiones totales de la industria muestran valores incluso mayores. Según la Comisión Económica para Europa (UNECE, 2021), estas industrias representan el 25 % de las emisiones totales de GEI y un 66 % de las emisiones del sector industrial a nivel global. Pupo y González

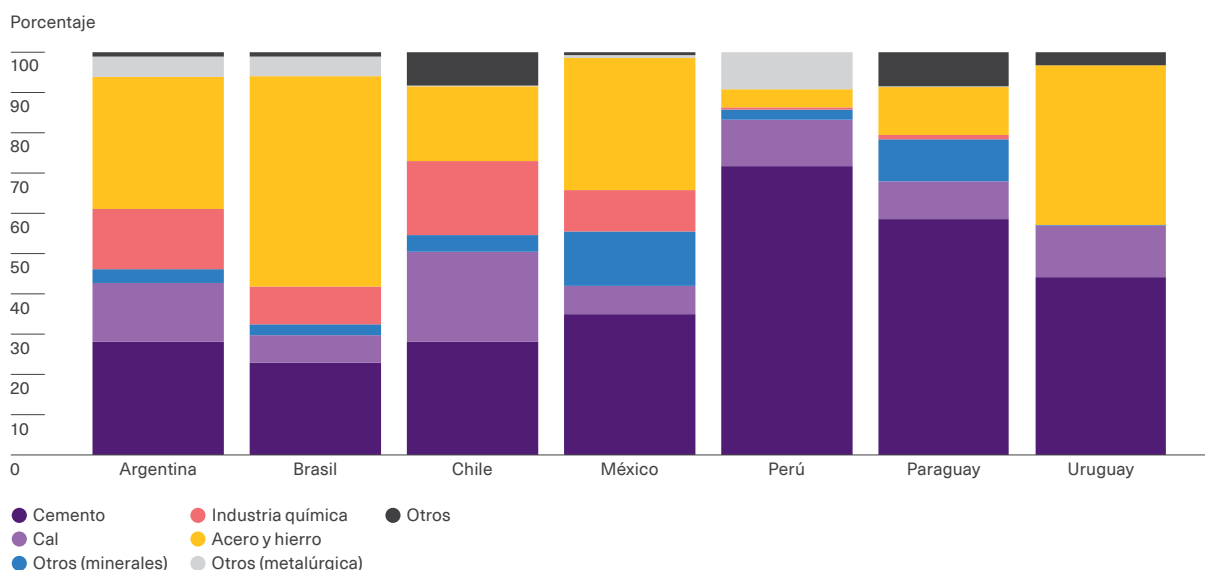
(2023) muestran que las emisiones de estos sectores en América Latina y el Caribe representan el 15 % del total de la región y el 90 % de las producidas por su sector industrial. Esos valores a nivel de la industria son similares a los reportados por los gobiernos de la región (Pupo y González, 2023) (gráfico 6.1).

En cuanto a las tres industrias destacadas, la del hierro y el acero representa el 1,7 % de las emisiones directas de América Latina y el Caribe y el 15 % de las emisiones directas del sector industrial de la región; la industria cementera es responsable del 1,3 % de las emisiones directas regionales y del 12 % de las del conjunto del sector, mientras

que la industria química representa el 3,4 % de las emisiones primarias regionales y el 30 % de las emisiones primarias industriales (Minx et al., 2021). El gráfico 6.2 muestra la intensidad de emisiones y energética para estos sectores. Se puede observar que el amoníaco y los químicos de alto valor (HVC)³ son los de mayor consumo energético, necesitando entre 46 gigajulios por tonelada de producto (GJ/t) y 80 GJ/t, respectivamente, y que emiten entre 1 y 2,4 toneladas de dióxido de carbono por tonelada de producto (tCO₂/t). Si bien el cemento tiene una intensidad energética significativamente menor que las otras industrias pesadas, por cada tonelada de cemento producida se emiten 0,6 tCO₂.

Gráfico 6.1

Emisiones de GEI resultantes de procesos industriales en países seleccionados de América Latina en 2018



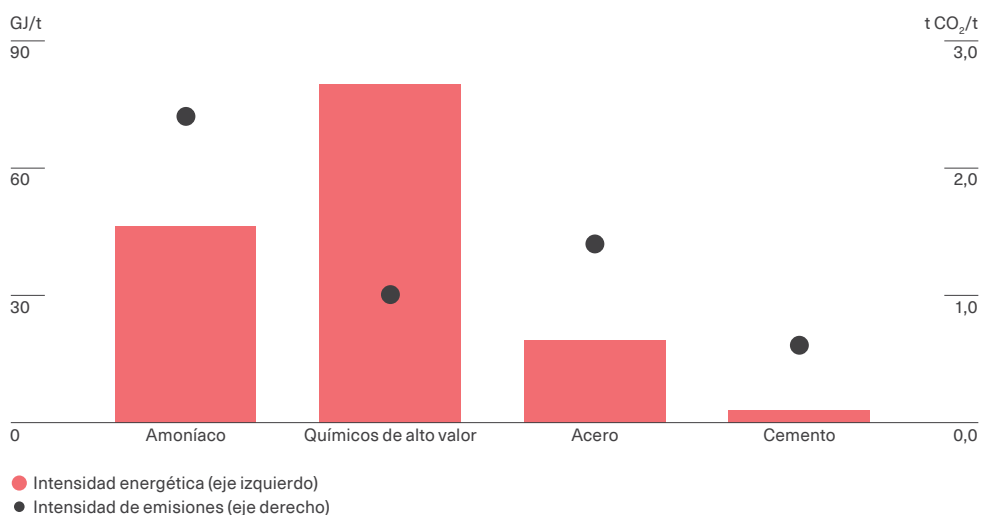
Nota: El gráfico ha sido realizado con información pública de los inventarios de gases de efecto invernadero (INGEI) de los países representados. La categoría "otros" incluye (i) el uso de productos no energéticos de combustibles y de solvente; (ii) la industria electrónica; (iii) la manufactura y utilización de otros productos; (iv) la industria de pulpa y papel; y (v) la industria de la alimentación y las bebidas. En el gráfico se excluye la categoría 2F (según la clasificación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático [IPCC, 2006]), constituida por las emisiones asociadas al "uso de productos sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono".

Fuentes: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019); MCTI (2022); MMA (2020); INECC (2018); MADES (2020), MINAM (2020) y Ministerio de Ambiente (2020).

³ No se incluye el metanol por no contar con el dato concreto; sin embargo, según lo reportado por la (AIE, 2021a) la intensidad energética rondaría los 40 GJ/t y la intensidad de carbono sería cercana a las 2,2 tCO₂/t.

Gráfico 6.2

Intensidad energética y de emisiones



Fuente: Elaboración propia con base en datos de AIE (2021a).

Las industrias cementera, acerera y química resultan esenciales para las economías modernas, son intensivas en carbono y cuentan con limitadas alternativas de mitigación

La importancia de estas industrias para el desarrollo de las economías puede ser observada en la evolución de la demanda de sus productos principales. Si se considera el período 1990-2020, la demanda global de acero creció cerca de 2,5 veces, mientras que la de cemento y plásticos se multiplicó por más de 3,5 (IPCC, 2023). Cuando se comparan estos crecimientos con los del PIB o de la población mundial, se puede ver que el producto mundial creció cerca de 2,5 veces en este período, mientras que la población mundial lo hizo en 1,5 veces (IPCC, 2023). Si bien la industria manufacturera no es el principal sector productivo de los países de América Latina y el Caribe, es fuente del 13 % de los empleos totales de la región y representa también cerca del 13 % de su PIB (ALACERO, 2021).

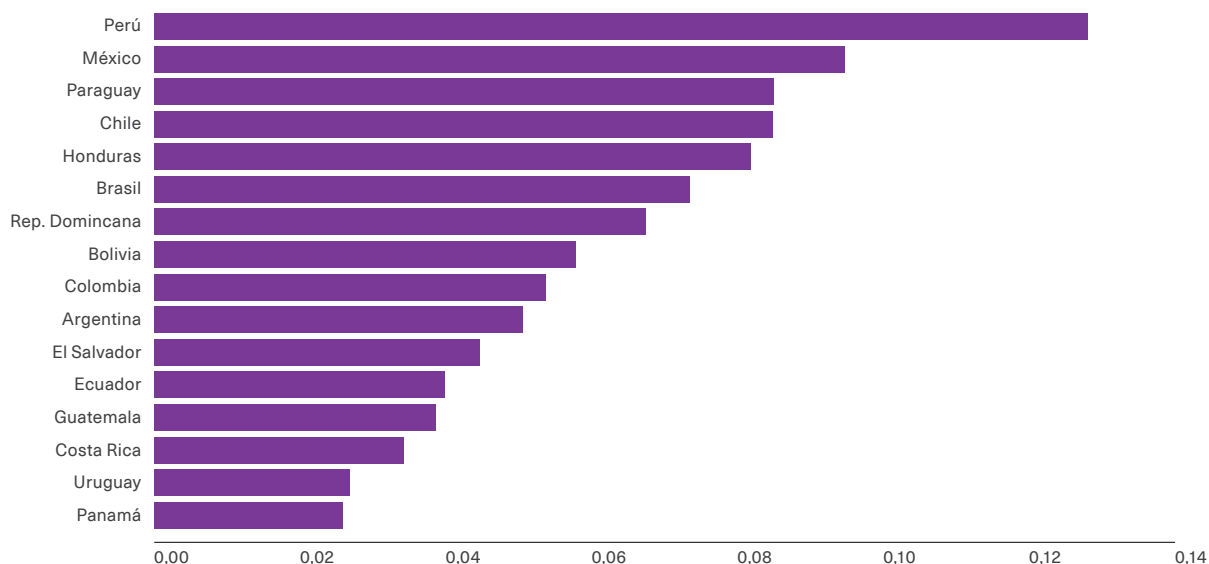
Como se explica más adelante, la transición energética ofrece una oportunidad de desarrollo de esta industria en la región. El gráfico 6.3 muestra el valor agregado del conjunto de estas tres industrias en los países con datos disponibles. Se puede observar que la industria pesada tiene un bajo impacto en países como Panamá y Uruguay, representando menos del 3 % del valor agregado de la economía, mientras que, por ejemplo, en Perú, representan casi el 13 %.

Finalmente, se percibe también una gran heterogeneidad en la región en cuanto a la intensidad energética, medida como el uso energético respecto al valor agregado, y la intensidad de carbono, medida como la cantidad de emisiones de CO₂ equivalente⁴ (CO₂eq) sobre el valor agregado. El gráfico 6.4 muestra la intensidad de carbono y energética para algunos países de América Latina y el Caribe. Se puede observar que, si bien hay una correlación positiva entre estas medidas, países como Costa Rica, República Dominicana y Uruguay tienen una alta intensidad energética, pero una intensidad de carbono significativamente menor que los principales productores industriales, como Argentina, Brasil y México.

4 El CO₂eq es una medida que permite comparar las emisiones totales de los distintos GEI.

Gráfico 6.3

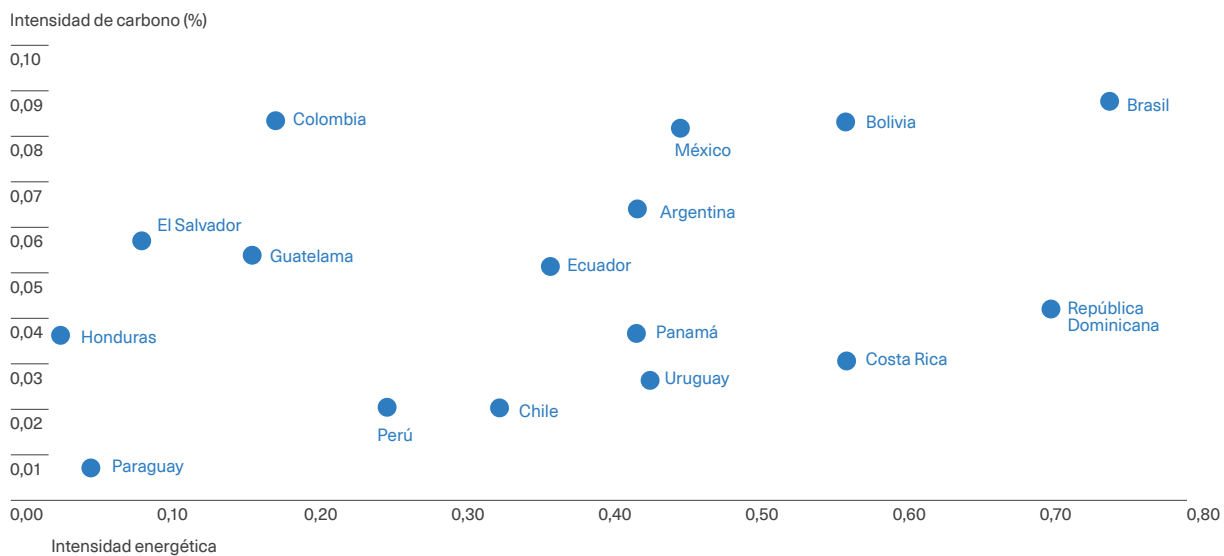
Proporción del valor agregado de las industrias pesadas en el valor agregado total de los países de América Latina y el Caribe en 2017



Fuente: Elaboración propia con base en datos de Aguiar et al. (2022).

Gráfico 6.4

Relación entre intensidad de carbono e intensidad energética en las industrias pesadas de países de América Latina y el Caribe en 2017



Fuente: Elaboración propia con base en datos de Aguiar et al. (2022).

Recuadro 6.1

Un caso de iniciativas privadas tempranas en transición energética

El Aeropuerto Internacional de Carrasco fue pionero en la generación de energías renovables. Entre 2015 y 2016, se comenzaron a realizar importantes obras con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la sustentabilidad de esta infraestructura. En 2018 se inauguró la planta solar, convirtiéndose en el primer aeropuerto en América Latina con energía renovable fotovoltaica. Los paneles instalados cuentan con tecnología de seguimiento solar, lo que les permite aumentar la captación de energía en cerca del 23 % o 24 % respecto a los paneles solares fijos. Para una correcta instalación, se requirió una inversión en planeamiento a fin de evitar la interferencia del reflejo solar con las aeronaves en circulación.

Además de este gran proyecto, se realizaron otras inversiones para la transición energética del aeropuerto, como son el remplazo de las calderas a gas por bombas de calor eléctricas, la instalación de luminarias con tecnología LED y la renovación de los ventiladores de los aires acondicionados. Recientemente, se comenzó a utilizar inteligencia artificial para modular la inyección de los ventiladores de aire acondicionado, con la finalidad de optimizar el consumo eléctrico, lo que permite, a su vez, medir y garantizar la calidad del aire en el interior del edificio. También se evaluó la expansión del parque solar y la inversión en un parque eólico fuera del predio, pero restricciones de la regulación uruguaya impidieron el avance de estos proyectos.

El aeropuerto está certificado con la norma ISO 14064-1 y en el Programa de Acreditación de Huella de Carbono en Aeropuertos (ACA), en su nivel 2, reconocimientos otorgados por la cuantificación y gestión realizadas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El proyecto contó con la promoción de la Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP), la cual proporciona financiamiento y la exoneración de ciertos impuestos, tasas y tributos. Este impulso, junto con las mejoras en eficiencia que implicaron los proyectos mencionados, permitió que la inversión total fuera recuperada en menos de cuatro años. Es importante destacar que los costos de los paneles fotovoltaicos han caído drásticamente desde la inversión del aeropuerto, lo que realza aún más el hecho de que, con correcta planificación y regulación y un adecuado apoyo financiero, proyectos privados pueden impulsar la transición energética que busca mejoras en eficiencia.

Fuente: Elaboración propia con base en las entrevistas al ingeniero Jorge Navarro, Gerente Corporativo de Infraestructura y Mantenimiento de Aeropuertos Uruguay, realizadas específicamente para este reporte.

Cemento

El cemento es el segundo producto más consumido en el mundo, solo superado por el agua (UNECE, 2021; Zhu et al., 2022) y se espera que su demanda crezca entre un 12 % y un 23 % para 2050 (AIE, 2018a). A su vez, el cemento es el producto industrial con mayores emisiones de CO₂ por dólar de ingresos. Cada dólar de ingreso generado emite 6,9 kilogramos (kg) de CO₂, mientras que, por ejemplo, para el acero este ratio es de 1,4 kg de CO₂ por dólar y para los químicos, 0,3 kg

de CO₂ por dólar (Czigler et al., 2020). En América Latina y el Caribe destacan Argentina, Brasil, Colombia y México en el sector del cemento, ya que, en conjunto, representan el 75 % de la producción regional. Cabe destacar que el cemento tiene un ratio de valor con relación al peso bajo, es decir, que tiene un elevado costo de transporte y un bajo costo de almacenamiento (Kusuma et al., 2022). Por ello, la mayor parte del cemento que se consume se produce de forma local,

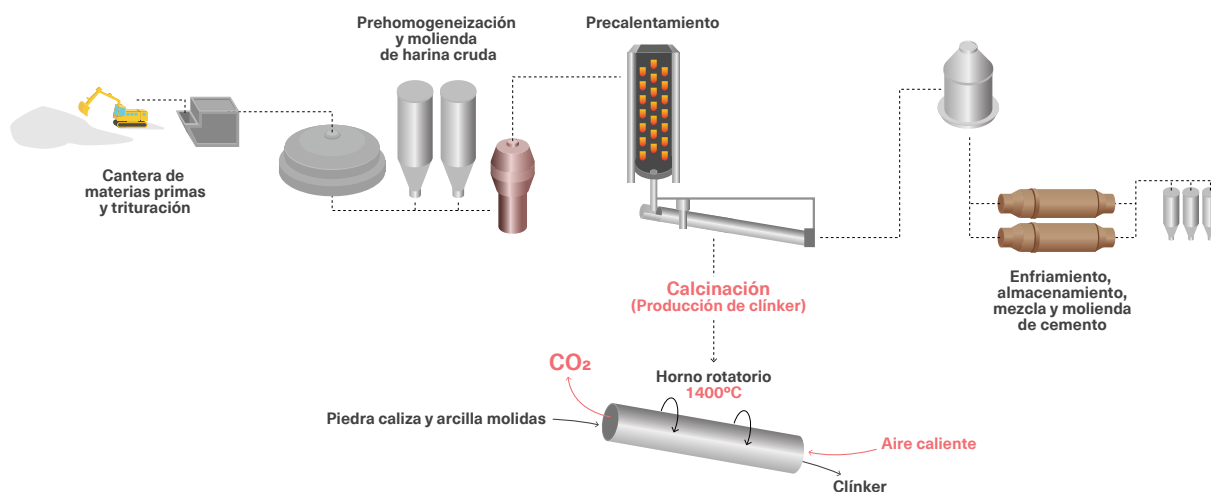
con algunas excepciones en las islas del Caribe, por lo que la industria es importante para el desarrollo del sector de la construcción en la mayoría de los países de la región. En un reporte de la Federación Interamericana del Cemento (FICEM, 2019), se observa que la gran mayoría de los países de la región tiene un consumo similar o inferior a su producción de cemento. La principal excepción es Surinam, donde el consumo es de 2 a 4 veces mayor que la producción. Luego se sitúan Chile, El Salvador, Jamaica, Puerto Rico y Trinidad y Tobago, donde la producción interna representa al menos el 80 % del consumo total.

● ●

La mayor parte del cemento que se consume es producido de forma local, por lo que esta industria es importante para el desarrollo del sector de la construcción en la mayoría de los países de la región

La producción de cemento no solo emite CO_2 . Tanto en el proceso de extracción de los insumos principales para la producción del cemento como en el propio proceso productivo se emiten diversos contaminantes locales. Durante la producción, se generan cenizas, desechos de rocas y polvo, los cuales contienen contaminantes del aire, como material particulado (MP)⁵ y desechos sólidos. En el propio proceso de producción también se desprenden grandes cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x) y, en menor medida, dióxido de azufre (SO_2) (Kusuma et al., 2022), los cuales son contaminantes del aire que afectan a la salud de las personas y que se descomponen en la atmósfera en $\text{MP}_{2.5}$ ⁶. En diversas etapas de la producción del cemento se utiliza agua para los sistemas de lavado y esta se mezcla con productos de limpieza y partículas de hierro, entre otras, lo cual la contamina (Adeyanju et al., 2020; Zhu et al., 2022). Es por todo esto que la industria necesita invertir en esfuerzos que le permitan satisfacer el incremento esperado de la demanda, minimizando los daños ambientales.

Figura 6.1
Proceso de producción del cemento



Fuente: Elaboración propia con base en UNECE (2021).

5 El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire. Su inhalación puede provocar problemas de salud, como el asma, la demencia y el aumento de la mortalidad por causas respiratorias.

6 La cifra indica el tamaño de las partículas en micrómetros. El $\text{MP}_{2.5}$ es el material particulado que representa mayores riesgos para la salud.

Recuadro 6.2

Un caso de iniciativas privadas con soluciones del lado de la demanda

RCD Reciclaje es la primera planta de procesamiento de residuos de la construcción de Uruguay. Esta empresa comienza sus operaciones en la obra, clasificando los residuos y transportando el escombro limpio, el cual es luego procesado en su planta. Utilizando una trituradora eléctrica, este residuo es transformado en áridos reciclados, que son empleados como materia prima para la fabricación de distintos productos de hormigón reciclado: pavimento ecológico, mobiliario urbano y macetas, entre otros. Si bien el hormigón reciclado aún no se utiliza para proyectos estructurales, la empresa se encuentra realizando un proyecto con la Facultad de Ingeniería para evaluar la viabilidad del uso de este material en dichos proyectos. Además de estos productos, la empresa ofrece planes integrales para la correcta gestión de los residuos, en línea con los principios de la economía circular.

El proceso de valorización y reciclaje tiene dos impactos importantes de sustentabilidad: primero, clasifica los distintos residuos de obra y reduce la cantidad de residuos que terminan en vertederos municipales; y segundo, disminuye las emisiones vinculadas a la demanda de cemento. Si bien para la elaboración del hormigón reciclado se utiliza cemento, al reutilizar el hormigón existente, hay menos necesidad de extraer nuevas materias primas, decreciendo así las emisiones asociadas a la producción de cemento. Además, el proceso de reciclaje implica un menor consumo de energía que la fabricación de cemento a partir de materias primas vírgenes.

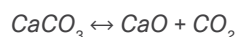
El emprendimiento se enmarca en la Ley de Gestión de Residuos, la cual busca la prevención y reducción del impacto negativo en la generación y manejo de residuos. RCD Reciclaje fue distinguida por la Red de Empresas por el Desarrollo Sostenible (DERES), por cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, sobre ciudades y comunidades sostenibles, y el ODS 12, sobre consumo y producción sostenible. También ha recibido el premio "Uruguay Circular", dentro de la categoría MiPymes, que otorga la Alianza para la Acción en Economía Verde (PAGE), junto con la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y la Agencia Nacional de Desarrollo (ANDE), y, por parte del Ministerio de Ambiente, ha sido galardonado con el Premio Nacional de Ambiente "Uruguay Natural".

Actualmente, la iniciativa beneficia a Montevideo y la zona metropolitana, aunque la empresa se encuentra evaluando un proyecto de plantas móviles para poder extender su alcance.

Fuente: Elaboración propia con base en las entrevistas a la arquitecta Giannina Ceruti, Directora y Cofundadora de RCD Reciclaje, realizadas específicamente para este reporte.

Para entender cómo es posible minimizar estas emisiones y daños, es importante comprender el proceso productivo del cemento. Este se obtiene mediante la molienda de materias primas, principalmente piedra caliza y arcilla, convirtiéndolas en polvo, que luego se calienta en hornos a altas temperaturas (1.450 °C), produciendo clínker de cemento, el cual se mezcla principalmente con yeso para crear el producto final. El 86 % de las emisiones de toda la cadena de valor, desde la extracción en cantera hasta la logística en obra, se producen en esta manufactura del clínker (UNECE, 2021). De este 86 %, el 60 % procede de la

calcinación de la piedra caliza (CaCO_3). En este proceso, al superarse los 900 °C, la piedra caliza se convierte en óxido de calcio (CaO), liberando CO_2 :



El restante 40 % se produce por la quema de combustibles para este proceso de calcinación. El combustible más común para la producción del clínker es el carbón, cuya quema genera las mayores emisiones de CO_2 entre todas las fuentes fósiles. Aproximadamente, por cada tonelada de cemento



que se produce, se liberan entre 700 kg y 935 kg de CO₂ (Bernstein et al., 2007), siendo este rango explicado por diferencias en la eficiencia energética, la intensidad de carbono en el combustible utilizado, la intensidad de carbono de la energía que se consume y el contenido de clínker en el cemento.



El 86 % de las emisiones de toda la cadena de valor del cemento se producen en la manufactura del clínker, su principal insumo

Dado el patrón de emisiones de la producción del cemento, las alternativas de mitigación y eficiencia energética se pueden dividir en dos partes. Primero están las políticas de eficiencia energética que permiten reducir la quema de combustibles fósiles y producir cemento de forma más eficiente. Segundo, aquellas que reducen las emisiones directas del proceso de calcinación. Estas emisiones son las más difíciles de mitigar, dado que son liberadas por la reacción química de la piedra caliza al ser expuesta a altas temperaturas. La principal alternativa en este sentido es reducir el contenido final de clínker en el cemento, puesto que la producción de este insumo es la que genera las mayores emisiones, o utilizar insumos que sustituyan ese producto.

Tecnologías para la transición energética

Al analizar el uso energético del sector, se observa que el 100 % de la energía térmica utilizada en la producción del cemento es para la obtención del clínker, mientras que los procesos de molienda y envasado emplean principalmente energía eléctrica (Pupo y González, 2023). Estos datos refuerzan la idea de que el proceso que requiere mayor innovación y mejoras de eficiencia energética en este caso es la producción del clínker.

Los dos principales avances en cuanto a medidas de eficiencia energética son la utilización de hornos modernos, que ofrecen una mejor relación entre la energía consumida y los productos obtenidos, y de combustibles alternativos en el proceso de quema, como la biomasa o los residuos (AIE, 2018a). Más del 65 % de la producción mundial de clínker utiliza hornos rotatorios con precalcinador y precalentadores de suspensión (Marmier, 2023), los cuales son la solución más eficiente para reducir las emisiones generadas en ese proceso de calentamiento (Heincke et al., 2023). El precalcinador tiene las ventajas de mejorar la tasa de descomposición del cemento, disminuir la carga térmica del horno rotatorio y reducir el tamaño del horno y la producción

a gran escala (Zhu et al., 2022). En la práctica, esto se traduce en menos emisiones de NO_x y en más recuperación del calor generado, lo que implica un menor consumo de electricidad y combustibles, y consecuentemente, una reducción en las emisiones de CO₂. Estos hornos, acompañados de calderas de recuperación del calor, pueden llegar a reducir en dos tercios el consumo energético de las plantas (AIE, 2018a). En América Latina y el Caribe, solo el 65 % de las plantas utilizan precalcinadores, por lo que existe un margen de mejora que resultaría en menos emisiones y más eficiencia en el proceso (Kusuma et al., 2022).

La vida útil de una planta de cemento oscila entre los 40 y 50 años. La edad promedio de las plantas de cemento a nivel global es de 18 años⁷, mientras que en América Latina y el Caribe es de 29 años (Liu et al., 2021). La antigüedad de las plantas es esencial para la transición energética. Los hornos de más de 20 años, que están lejos de su amortización total, son en general menos eficientes. Las empresas serán reticentes a invertir en esfuerzos de eficiencia energética para reemplazar estos hornos, dado que se encuentran lejos de su amortización total. Por su parte, las plantas

⁷ Calculado utilizando datos de la Global Infrastructure Emission Database (GID) (<http://gidmodel.org.cn/>). La edad promedio se calcula ponderando por la capacidad de la planta. La edad de las plantas se presenta en intervalos de 5 años, por lo que se utiliza el punto medio del rango para calcular el promedio.

de escasa edad son en general más eficientes, como en el caso de República Dominicana, donde más del 80 % de la capacidad de producción se encuentra en fábricas que tienen menos de 15 años. Pupo y González (2023) muestran, por ejemplo, que el consumo energético de las plantas de ese país es significativamente menor que las del principal productor de cemento de la región, Brasil. Como reporta la FICEM (2019), América Latina y el Caribe se encuentra en un proceso de modernización de sus plantas.

En cuanto al uso de combustibles, la biomasa se encuentra como la opción de más eficiencia y menos emisiones. La biomasa a partir de leña captura carbono en el período de silvicultura, por lo que el neto de las emisiones es significativamente menor que la quema de carbón. Otros insumos de biomasa utilizados son los desechos agrícolas e, incluso, los residuos alimentarios domésticos preseleccionados (Mathioudakis et al., 2021). En este sentido, América Latina y el Caribe tiene un gran potencial debido a las condiciones naturales que permiten una cadena de producción estable de biomasa para este uso. La biomasa ya puede utilizarse para sustituir el 20 % de los combustibles en la industria del cemento sin inversiones en capital (Rahman et al., 2016), aunque estos combustibles requieren pretratamiento debido a que son insumos húmedos con un exceso de contenido de oxígeno (Bui et al., 2017; Cortada Mut et al., 2015). En la actualidad, la biomasa representa menos del 5 % de los combustibles utilizados en los países en desarrollo, siendo Brasil la excepción, donde representa cerca del 40 % (AIE, 2018a).

La Agencia Internacional de la Energía (AIE), en sus escenarios de descarbonización, proyecta que la industria del cemento requerirá principalmente tecnologías innovadoras para alcanzar sus metas en este ámbito, entre ellas, la captura de carbono. Para sus proyecciones, la AIE desarrolla un índice de madurez de las tecnologías. En el caso de la eficiencia energética, luego de la captura de carbono con utilización o almacenamiento, las tecnologías que podrían tener un moderado impacto son la electrificación de la generación de calor, la generación de calor a partir de energía solar, el uso del hidrógeno y las mejoras de eficiencia en el proceso de molienda. No obstante, las reducciones proyectadas de emisiones por estas mejoras representan menos del 40 % de lo que se podría mitigar mediante la reducción del clínker o la captura de carbono (AIE, 2018a). Finalmente, el hidrógeno es

un potencial sustituto energético que se encuentra en etapa temprana de implementación. La industria del hidrógeno verde se discute en el capítulo 5, mientras que la captura de carbono es discutida más ampliamente en el capítulo 10.

La alternativa con mayor potencial de descarbonización es reducir el uso de clínker para la producción de cemento. El cemento Portland estándar, que es el utilizado en Estados Unidos, contiene cerca del 90 % de ese producto (o factor de clínker). Sin embargo, en el resto del mundo, el contenido de clínker es significativamente menor. En América Latina y el Caribe, el factor de clínker es del 71 %, aunque países con alta producción de cemento, como Argentina y Brasil, tienen factores por debajo del 70 %. La AIE, en sus escenarios de descarbonización, requiere que el contenido de clínker en el cemento sea del 60 % para 2050. La resistencia temprana a la compresión del cemento disminuye con menores porciones de clínker, por lo que, para llegar al objetivo del 60 %, se requiere la utilización de insumos alternativos a este producto.



América Latina y el Caribe tiene un gran potencial de descarbonización mediante la utilización de la biomasa para la generación de calor y el uso posterior de la ceniza de la biomasa como sustituto del clínker

Las principales opciones para reducir el factor clínker actualmente viables son la ceniza volante, la cual surge de la quema de carbón, y la escoria granulada de alto horno (EGAH), que es generada como residuo en la producción del acero de alto horno. Este insumo es actualmente viable y ya existen regulaciones que permiten en Europa producir cemento con 95 % de contenido de EGHA (AIE, 2018a). En cuanto a la ceniza volante, el contenido permitido en el cemento es del 25 % al 35 % (AIE, 2018b). Se desprende de lo anterior que las dos principales opciones con mayor viabilidad son aquellas que usan residuos de procesos intensivos en carbono. Se espera que la disponibilidad de ambos residuos disminuya en el largo plazo (Kusuma et al., 2022) debido a la reducción en el uso de carbón y a los avances tecnológicos en la industria del acero, que se discutirán en el próximo apartado.

Otras opciones son los materiales puzolánicos naturales, obtenidos de compuestos volcánicos o sedimentos de rocas, ceniza de biomasa o humo de sílice. Sin embargo, estos materiales no están ampliamente disponibles y son demandados también por otras industrias. La piedra caliza es igualmente un sustituto, pero debe estar acompañada de medidas sofisticadas en la producción y el uso (ECRA, 2017). La ceniza a partir de la biomasa es una alternativa complementaria al empleo de la biomasa como sustituto de combustibles, pero con un alto impacto medioambiental (Teixeira et al., 2016). Las fuentes de

ceniza de biomasa podrían ser la madera forestal y de demolición, la paja, los lodos de depuradora y de papel, el estiércol y los residuos agrícolas (Kusuma et al., 2022). Si bien esta ceniza podría ser utilizada para sustituir hasta un 80 % del clínker en el cemento (Campos Teixeira et al., 2020), se ha reportado que esta ruta requeriría mayor uso de agua y más tiempo de preparación (Khalil et al., 2014; Medina et al., 2017). La región tiene un gran potencial de descarbonización mediante el uso de biomasa para la generación de calor, utilizando posteriormente la ceniza de la biomasa como sustituto del clínker.

Políticas para avanzar en la descarbonización de la industria cementera

Existe limitada información en cuánto a la viabilidad económica de las alternativas para la descarbonización en el sector cementero, especialmente para América Latina y el Caribe. A nivel global, Heincke et al. (2023) muestran que las medidas de reemplazo del clínker por cenizas y residuos y el mayor uso de la biomasa como combustible resultaría en un costo neto negativo por tonelada de carbono reducida. Un estudio para Estados Unidos muestra que la producción de cementos a partir de arcillas caoliníticas calcinadas puede aumentar los beneficios netos en el 20 %, reduciendo las emisiones en un 37 % (Khung y Crete, 2022). Este estudio también destaca que la producción con EGAH y ceniza volante podría incrementar los beneficios netos en torno al 7 %, mientras que las reducciones en emisiones serían del 43 % y el 27 %, respectivamente. También para Estados Unidos, Shwekat y Wu (2018) indican que, si se incorporaran el costo social del carbón y los daños a los recursos naturales y por contaminación del aire en el análisis de costo-beneficio, un cemento con cerca del 20 % de ceniza volante podría resultar en un costo negativo de producción, explicado principalmente por los impactos medioambientales que tendría esta sustitución en la producción del cemento. Sin embargo, la AIE et al. (2023) muestran que, en general, las tecnologías de bajas emisiones, en el caso del cemento, son en promedio 75 % más caras que las técnicas de producción tradicional.

En el caso del concreto, Khan et al. (2020) muestran que el costo de producción en India de concreto verde (variedad en la que se reemplaza el 50 % del

cemento por ceniza volante) es un 10 % inferior al del concreto tradicional, mientras que las propiedades de ambos son equivalentes. Gallardo y Elevado (2017) señalan que una mezcla que reemplaza el 75 % del cemento con ceniza volante mejora la calidad del concreto, reduciendo las emisiones por el uso de cemento, y disminuye el costo de producción en hasta el 12,5 %.

Para analizar las políticas sectoriales que se deberán impulsar en América Latina y el Caribe es importante contextualizar el sector del cemento y de la construcción en la región. El 20 % de la población urbana vive en asentamientos informales, donde las construcciones utilizan gran cantidad de recursos de baja calidad (Villagrán-Zaccardi et al., 2022). Estas construcciones se realizan con concreto con alto contenido de cemento de bolsa, lo que resulta ineficiente y tiene una mayor huella de carbono. A su vez, la región ya ha avanzado en la descarbonización del cemento, reduciendo el contenido de clínker y adoptando el uso de hornos de última tecnología. Al mismo tiempo, la disponibilidad de los principales sustitutos al clínker, como la escoria y la ceniza volante, ha ido disminuyendo en la región (Villagrán-Zaccardi et al., 2022). La otra medida principal de descarbonización, la captura de carbono, es una tecnología que actualmente resulta demasiado cara para la región. Finalmente, existe un nivel muy alto de informalidad en la construcción y hay grandes carencias en las normas técnicas y los estándares de edificación.

Cuadro 6.1

Políticas para la industria del cemento

Desafío	Objetivo	Políticas
Aumento de la demanda de cemento y elevada intensidad de carbono asociada con las emisiones directas de la producción del clínker	Reducción en el uso de clínker	Educación en materia de eficiencia en el uso del concreto Adopción de normas técnicas sobre la composición y el rendimiento del cemento Promoción de los principios de circularidad y reciclaje del hormigón
	Sustitución del clínker por insumos alternativos	Inversión en conectividad entre productores de biomasa y plantas cementeras para fomentar una mayor utilización de la biomasa como insumo energético y ceniza de biomasa como sustituto del clínker

En consecuencia, se destacan tres principales focos de política para descarbonizar al sector cementero en América Latina y el Caribe. Primero, fomentar el uso de biomasa como combustible y como sustituto del clínker en el caso de la ceniza de biomasa. Para esto es necesario una infraestructura adecuada para el transporte de carga entre las plantas cementeras y las fuentes de biomasa. Además, podría ser provechoso fomentar esa infraestructura en zonas industriales para, por ejemplo, disminuir los costos de transporte. El rol de productor agrícola de la región y la concentración poblacional en pocos centros urbanos, que permitiría una recolección concentrada de residuos orgánicos, deberían ser aprovechados para utilizar esos desechos. El segundo foco debería estar en mejorar aún más la eficiencia en el uso del cemento. Para ello será necesario el fomento de la capacitación, pero también nuevas normas técnicas y códigos de construcción e iniciativas que promuevan la formalización del sector. Finalmente, vinculado a las dos políticas anteriores, se deberá incentivar una mayor circularidad, reutilizando el concreto y los desechos industriales para su quema y mejorando la eficiencia en el uso del cemento y el concreto. Cabe destacar que, dada la elevada informalidad del sector, el hecho de que la mayor parte del cemento sea abastecido localmente, junto con los bajos márgenes de beneficio y la alta competitividad de este sector, pueden ser señales en contra de regulaciones del tipo de precios al carbono para esta industria. Esto se debe a que la alta

informalidad impediría la correcta aplicación y monitoreo del impuesto, mientras que los actores formales se verían severamente afectados por la política, generando distorsiones en la competitividad del sector.

Las principales políticas de mitigación en el sector del cemento deberán focalizarse en el impulso a la circularidad, la adopción de normas técnicas y la sustitución del clínker por insumos alternativos

En América Latina y el Caribe se debe destacar la FICEM, que representa a las empresas productoras, institutos y asociaciones de cemento de los países de la región, además de España y Portugal. Dentro de su visión se encuentra el fomento del desarrollo sostenible en la industria del cemento. La FICEM forma parte de la Asociación Global de Cemento y Concreto (GCCA, por sus siglas en inglés) y adhiere a su hoja de ruta para un cemento y hormigón neutro en carbono para 2050 (GCCA, 2021). Diez países en la región cuentan ya con hojas de ruta⁸ de la FICEM para la descarbonización del cemento: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Guatemala, Honduras, México, Panamá, Perú y República Dominicana,

8 Una hoja de ruta es un documento o plan estratégico que establece los pasos o hitos claves necesarios para alcanzar un objetivo específico.



mientras que Brasil ha desarrollado una propia. Estos países comprenden el 90 % de la producción de cemento de la región (GCCA, 2021). Esos documentos destacan que la región ya ha realizado esfuerzos en busca de la modernización del sector dirigidos a su descarbonización, principalmente con la reducción en el factor clínker y la renovación de los hornos; sin embargo, existe margen de mejora

en cuatro aspectos. El primero y más relevante es continuar con la disminución en el factor clínker; el segundo, extender las actualizaciones del parque de hornos; el tercero, aumentar la tasa de sustitución de combustibles fósiles; y finalmente, descarbonizar la generación eléctrica o fomentar la autogeneración con energías limpias en los casos en que es eficiente (GCCA, 2021).

Acero y hierro

Globalmente, el sector del acero es el principal consumidor industrial de carbón. Este insumo representa el 75 % de la demanda energética del sector y el 25 % de las emisiones mundiales de la industria a nivel global (AIE, 2020d). Dentro de América Latina y el Caribe, por ejemplo, el sector metalúrgico brasileño demanda más del 72 % del carbón vegetal producido en el país, siendo Brasil el principal productor global de este material combustible (van Dam et al., 2017). La producción de acero en América Latina y el Caribe representa cerca del 4 % de la producción mundial, siendo Brasil y México los principales países fabricantes, con cerca del 84 % del total de la región, seguidos por Argentina (8 %), Perú, Colombia y Chile (2 % cada uno) (ALACERO, 2022).



El sector del acero es el principal consumidor industrial de carbón, insumo utilizado para la generación de altas temperaturas

El acero es el tercer material a granel fabricado más abundante, solo superado por el cemento y la madera, y sus propiedades son tener alta durabilidad, resistencia y reciclabilidad y un bajo costo (AIE, 2020d). Cerca del 50 % de la producción de acero es utilizada en la construcción; le siguen en importancia por consumo la industria automotriz y la maquinaria mecánica, con una demanda del 17 % del acero producido cada una, mientras que la fabricación de productos metálicos representa un 12 % del uso (ALACERO, 2022). La capacidad de producción de acero bruto más que

se duplicó en los últimos 20 años, y el 85 % de este crecimiento se dio en países en desarrollo, principalmente en China (AIE, 2020d). El fuerte aumento de la demanda de acero propició un crecimiento en el parque de hornos acereros. Dado que la vida útil de esas instalaciones está estimada entre 20 y 24 años, el rápido crecimiento de las plantas plantea una dicotomía. La edad promedio de estos nuevos hornos es de 13 años. Si se operan durante toda su vida útil, las emisiones provenientes de estos hornos pueden agotar la mayor parte del presupuesto de carbono para el sector (AIE, 2020d). En caso de no utilizarse en su capacidad máxima, se tendría un gran parque de hornos como activos varados. A su vez, la AIE proyecta que la demanda global de acero hacia 2050 aumente en más de un tercio respecto a su nivel actual. Por este motivo, existe una gran presión sobre el sector para descarbonizar su producción y poder hacer frente a la demanda creciente con un parque de hornos relativamente joven en países en desarrollo.

El 95 % de las emisiones del sector ocurren en el proceso de producción del acero y en su finalización y distribución (Zoryk y Sanders, 2023). Estas emisiones se deben principalmente al alto consumo energético, puesto que los combustibles fósiles son la fuente principal. El sector representa el 20 % del consumo energético de los sectores industriales a nivel global y el 8 % del consumo energético mundial (AIE, 2020d). La producción de acero puede realizarse principalmente mediante dos vías. La más común es la vía primaria, la cual representa cerca del 70 % de su producción global y es aquella en la que se obtiene acero principalmente a partir de mineral de hierro, por lo general, utilizando hornos altos y acerías de oxígeno básico

(BF-BOF, por sus siglas en inglés). En este proceso, los hornos altos son alimentados con mineral de hierro, coque, carbón, gas natural, monóxido de carbono e hidrógeno para producir hierro fundido. También se utiliza cal o dolomita para controlar las impurezas del proceso. Una tonelada de hierro fundido creado de esta forma requiere cerca de 15 GJ de energía y genera en promedio 2,2 t de CO₂ (AIE, 2020d). El hierro fundido es luego utilizado en la acería de alto horno junto con chatarra para producir el acero.

Todos los insumos utilizados en el proceso de producción del hierro son intensivos en carbono. La extracción del mineral de hierro contribuye en un 4 % a las emisiones de toda la cadena de valor de este producto (Zoryk y Sanders, 2023). Estas emisiones pueden disminuir mayormente con medidas de electrificación y con la generación eléctrica renovable. Sin embargo, el mineral de hierro debe ser preparado para su utilización. Este proceso utiliza calor y presión, para lo cual se necesita carbón, coque, gas natural y electricidad. El carbón y el gas natural, empleados tanto para el preparado del mineral de hierro como en el proceso principal, son dos combustibles fósiles con altas emisiones de carbono, siendo el primero el más intensivo de los dos, puesto que su combustión desprende cerca del doble de CO₂ que el gas natural (EPA, 2009). El coque es un agente reductor con alto contenido de carbono, el cual es producido a partir de la quema de carbón. Este proceso demanda cerca del 16 % del carbón globalmente. El monóxido de carbono y el hidrógeno, utilizados también en este método, son intensivos en carbono, ya que se generan principalmente con carbón y coque. Finalmente, la cal y dolomita liberan CO₂ en su combustión, como se ha explicado en la elaboración del cemento.

Una alternativa a este proceso, que actualmente representa solo el 10 % de la producción primaria de acero mundial, es la reducción directa del hierro (DRI, por sus siglas en inglés) utilizando primero gas natural y, posteriormente, hornos de arco eléctrico (EAF, por sus siglas en inglés). Las principales diferencias entre este proceso y el anterior son que requiere minerales de hierro de alta calidad, la utilización como agente reductor de hidrógeno, generado a partir de gas natural en lugar de coque, y un mayor uso energético, principalmente electricidad y gas natural (AIE, 2020d). Este método es menos intensivo en emisiones de GEI, sobre todo, por su escaso o nulo uso del carbón y el coque, con un alto potencial de descarbonización si la electricidad utilizada es generada con fuentes limpias. Usando como parámetro

la intensidad de carbono por generación eléctrica a nivel global, esta ruta actualmente emite en promedio 1,4 tCO₂/t de hierro crudo, de los cuales 0,4 tCO₂ son explicados principalmente por emisiones secundarias del uso de electricidad. Esto representa poco menos de dos tercios de las emisiones de la opción de BF-BOF. Con una matriz eléctrica 100 % verde, estas emisiones representarían menos de la mitad de las emisiones del proceso primario de BF-BOF. La escasez de mineral de hierro de alta calidad es la principal limitación a la expansión de esta ruta (Zoryk y Sanders, 2023). Solo el 4 % de la oferta global de mineral de hierro es adecuado para un uso de este tipo (Nicholas y Basirat, 2022), siendo Brasil el principal proveedor mundial de este mineral (Franklin Templeton, 2023)

La vía secundaria de producción del acero utiliza chatarra como insumo principal y se realiza con un horno de arco eléctrico, cuya principal fuente de energía es la electricidad, en lugar del carbón. En este método, se realiza una primera reducción del mineral de hierro en estado sólido usando derivados del gas natural, en vez de fundirlo en los hornos. Si bien este método emite significativamente menos GEI, por sí sola no sería viable para satisfacer el incremento proyectado de la demanda de hierro para 2050 dado que se precisa chatarra para su producción, por lo que será necesaria la vía primaria para la creación genuina del acero a partir de mineral de hierro (Blank, 2019). Anualmente se utilizan cerca de 700 millones de toneladas (Mt) de chatarra en esta ruta, mientras que se producen 1.870 Mt de acero crudo por año.



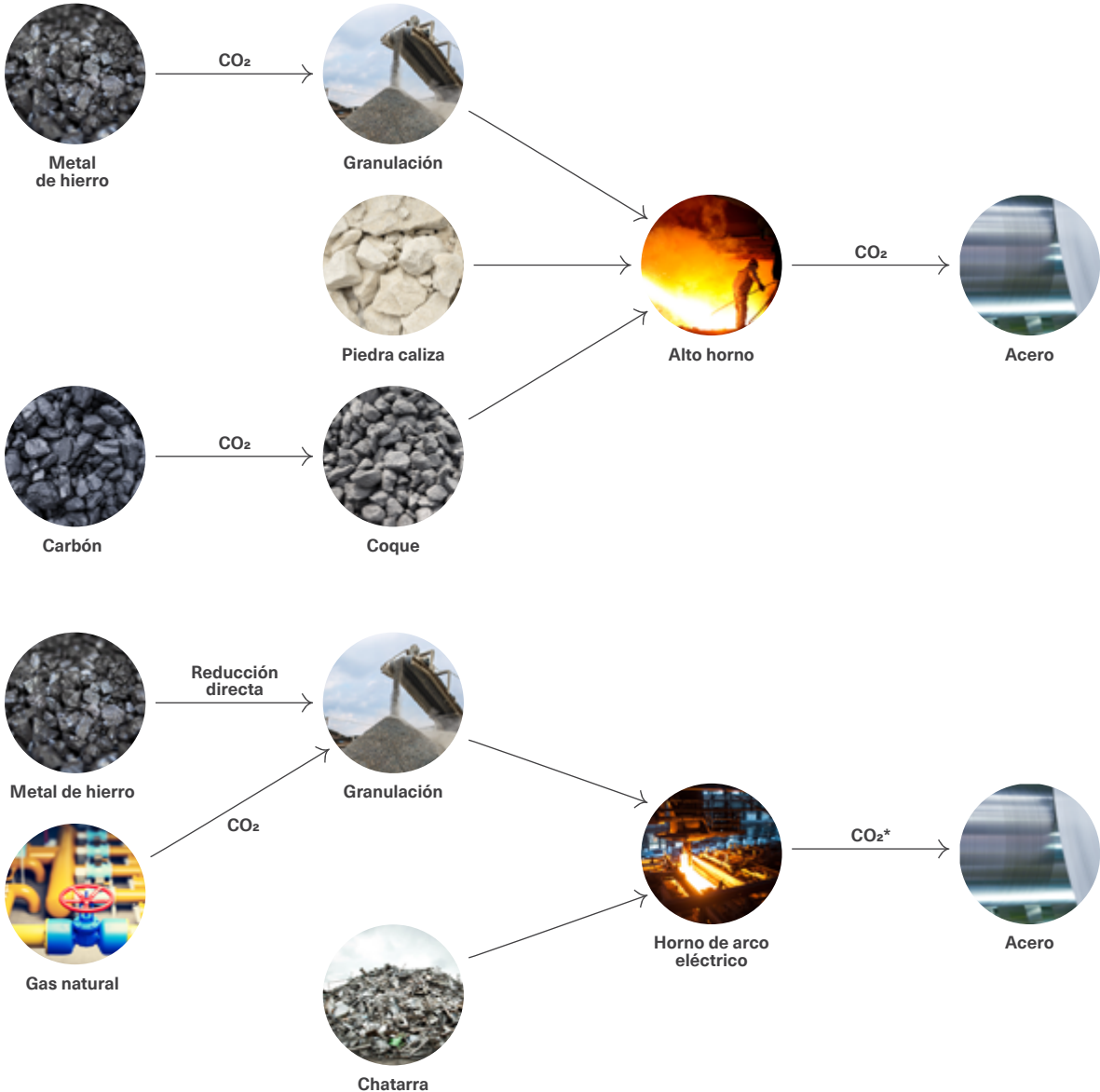
El acero en América Latina y el Caribe es producido utilizando hornos eléctricos en mayor proporción que en el promedio mundial

Algo que distingue a América Latina y el Caribe del resto del mundo es que ambos métodos de producción se utilizan en proporciones similares. En Brasil, la ruta primaria es la predominante, representando cerca del 75 % de la producción, similar al promedio mundial, mientras que en México la secundaria representa más del 80 %. En el resto de la región, la ruta secundaria también es la preferida (Pupo y González, 2023). Esta diferencia en el mayor uso de la vía secundaria y el hecho de que la matriz eléctrica de América Latina y

el Caribe sea relativamente limpia explican, en parte, que en la región las emisiones por tonelada de acero sean menores que el promedio global. En 2019, las emisiones de la producción de acero (medidas en kg

de CO₂/t) fueron un 12 % menores que en el resto del mundo y 25 % inferiores a las de China, el principal productor de hierro en el mundo, con más del 50 % de la producción total (ALACERO 2021).

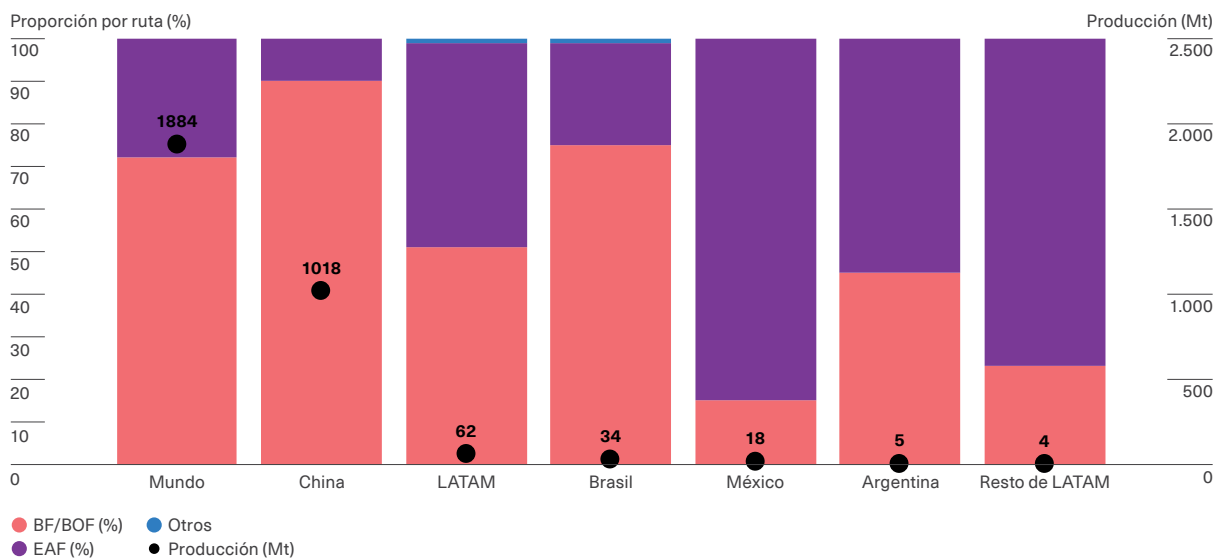
Figura 6.2
Proceso de producción del acero



*La intensidad de emisiones del proceso dependerá de la intensidad de emisiones de la matriz eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6.5

Producción de acero crudo según la metodología



Fuente: Elaboración propia con base en datos de Pupo y González (2023).

Además de tener altas emisiones de CO_2 , la producción de hierro genera otros contaminantes, entre ellos los principales del aire (SO_2 , NO_x y $\text{MP}_{2.5}$) (AIE, 2020d). El proceso productivo también contamina el suelo a partir de la liberación de metales pesados (Khudhur et al., 2018; Yang et al., 2018). Un subproducto contaminante de la elaboración del acero es la escoria (*slag*). Cada tonelada de acero producida por la ruta primaria genera cerca de 400 kg de

escoria, mientras que el método de arcos eléctricos produce cerca de la mitad de esa sustancia (World Steel Association, 2018). La manipulación de escoria implica riesgos de seguridad y su almacenamiento es costoso. Sin embargo, este producto es utilizado frecuentemente como fertilizante y puede emplearse como sustituto del clínker en la producción de cemento (AIE, 2018a).

Tecnologías para la transición energética

A diferencia del cemento, la mayor parte de las emisiones del hierro son por el consumo energético, dada la gran necesidad de energía de los hornos para alcanzar altas temperaturas. Por lo tanto, las soluciones tecnológicas que permitirían reducir las emisiones de este sector están concentradas principalmente en la sustitución de los insumos fósiles, mejoras en la eficiencia, la electrificación y la captura de carbono con uso o almacenamiento.

La AIE, en sus escenarios de descarbonización, proyecta que para 2050 será necesario disminuir en un 40 % el uso del carbón en este sector, duplicando el uso de energía eléctrica. Para lograrlo es preciso incrementar la proporción de la producción de acero mediante la vía secundaria. Otra de las razones por las que la AIE prevé un aumento tan grande en el uso de electricidad es el reemplazo del carbón por hidrógeno verde, por lo que la AIE proyecta que el

30 % de la electricidad que se utilice será destinada a la producción de este insumo. Dada su riqueza en recursos naturales, América Latina y el Caribe tiene un amplio potencial para la producción de hidrógeno verde y electricidad generada con fuentes renovables. A su vez, la región no es un gran demandante de hierro en el mercado global, por lo que puede convertirse en un futuro cercano en un exportador neto de hierro de bajas emisiones producido a partir de la ruta secundaria (AIE, 2020a). Esto requeriría que se invierta en plantas de fabricación de acero primario con producción de hidrógeno electrolítico. En los países con grandes reservas de gas natural, se podría considerar este recurso como una alternativa de corto plazo.

Como ya se mencionó anteriormente, los altos hornos nuevos ya incorporan medidas de eficiencia energética. China, por ejemplo, ha invertido fuertemente en la producción de cemento con acerías de alto horno de elevada eficiencia y ha cerrado acerías anticuadas, ineficientes e, incluso, algunas ilegales (AIE, 2020a). Esto se puede constatar cuando se observa la edad promedio de los hornos a nivel mundial. En el caso de China, la edad promedio de la flota de hornos es de 16 años; en América Latina y el Caribe este promedio es de 28 años, mientras que el promedio mundial se sitúa en 25 años. Estos números contrastan fuertemente con los de los países desarrollados. En Estados Unidos el promedio ronda los 35 años, mientras que, en Europa occidental este valor se sitúa en torno a los 41 años (Wang et al., 2019). Estos valores revelan dos puntos a destacar. El primero, dado que la vida útil de los hornos es de aproximadamente 20-25 años, edad a la cual se puede reemplazar su revestimiento interior (AIE, 2020a), el periodo de funcionamiento de esas instalaciones a nivel mundial va mucho más allá de su vida útil, lo que causa mayores ineficiencias en la producción. Segundo, los hornos de América Latina y el Caribe tienen una edad promedio relativamente baja en comparación con los países desarrollados, lo que explica en parte la mayor eficiencia energética en la producción de acero (Pupo y González, 2023).

Dentro de las tecnologías que la AIE establece como actualmente maduras o en etapa de adopción temprana se encuentra la conversión de gases de escape en combustibles, el uso del biocarbón y la utilización de la reducción directa del hierro a base de gas natural y arcos eléctricos. Esta última es la que tiene mayor

potencial de mitigación (AIE, 2020a). Aquellas cuya implementación aún no es viable, pero que podrían tener altos potenciales de mitigación, son la fundición con captura y utilización o almacenamiento de carbono y la reducción directa a partir de hidrógeno electrolítico. Sin embargo, esas técnicas solo estarán disponibles como temprano en 2030. Una alternativa innovadora que se destaca es la fabricación de hierro con hidrógeno (HYBRIT, por su sigla en inglés). Esta tecnología permite la fabricación primaria del acero sin utilización de combustibles fósiles, mediante hornos de arcos eléctricos e hidrógeno producido por medio de la electrólisis del agua.



Las soluciones tecnológicas que permitirían reducir las emisiones de este sector están concentradas principalmente en la sustitución de los insumos fósiles, mejoras en la eficiencia, la electrificación y la captura de carbono con uso o almacenamiento

Finalmente, además de los esfuerzos de eficiencia energética, son necesarias las contribuciones tanto del lado de la oferta como de la demanda. En el caso de la oferta, se ha observado en los últimos años un avance en los anuncios de emisiones cero por parte de grandes acerías; sin embargo, la suma de la producción de las compañías adheridas solo representó el 8 % de la producción mundial de acero en 2019 (Blank, 2019). En América Latina, destaca la Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO), la cual promueve la sustentabilidad y rentabilidad de este sector en la región. Esas prácticas unifican los esfuerzos del lado de la industria, mientras que la Asociación representa al sector acerero de la región ante organismos internacionales. En 2022 esta entidad presentó el primer reporte consolidado de sustentabilidad del sector del acero en América Latina.

También se observan iniciativas importantes por parte de actores privados. La empresa Ternium, en su planta en Argentina, cuenta con el récord de reemplazo de carbón mineral por gas natural como agente reductor. En su planta en Brasil, realizó un acuerdo con los responsables del relleno sanitario

del municipio de Seropédica para el aprovechamiento del biometano. En sus plantas de Guerrero y Puebla (México), Ternium captura el CO₂ del proceso de reducción del mineral de hierro, el cual es luego utilizado, por ejemplo, en la industria de bebidas (ALACERO, 2021). La empresa Gerdau, en Brasil, tiene iniciativas de producción de acero utilizando carbón vegetal. La biomasa utilizada para la producción del carbón vegetal es, a su vez, producida por una firma certificada en el Forest Stewardship Council (FSC). Gerdau en Ouro Branco también ha desarrollado grandes esfuerzos de eficiencia energética, mediante cambios en la combinación de fuentes combustibles, así como en gestión de la energía. También en su planta de Várzea do Lopes, se comenzaron a utilizar camiones propulsados a gas natural y buses eléctricos (ALACERO, 2021).

Del lado de la demanda, se ha observado un fuerte crecimiento de la demanda de acero “verde” o acero libre de emisiones, impulsada principalmente por el sector del transporte. Hasta mayo de 2023, se habían registrado 48 acuerdos de suministro de acero verde o libre de emisiones, de los cuales, 21 fueron alcanzados con firmas del sector del transporte (Roca, 2023). A nivel global, destacan Steel Zero, creada en 2022 por el Climate Group, y First Movers Coalition (FMC),

fundada en 2021, con el objetivo de establecer mercados para la comercialización de tecnologías limpias innovadoras. En el caso de Steel Zero, esta iniciativa promueve el uso del acero verde, comprometiendo a las firmas que se unen a ella a que el 50 % de la demanda de este producto sea de este tipo y alcanzar el 100 % para 2050. FMC establece que, para 2030, al menos el 10 % del volumen del acero demandado será libre de emisiones. En el caso de China, destaca Baosteel, compañía acerera cuya producción es equivalente a la de India, el segundo fabricante a nivel global (AIE et al., 2023). Baosteel finalizó un acuerdo con Mercedes-Benz en 2022 por el que se compromete, desde 2026, a reducir las emisiones gradualmente entre el 50 % y el 80 %, para finalmente producir 95 % de su acero libre de emisiones (SteelOrbis, 2022).

En general, el acero libre de emisiones se vende a precios más altos, y se está observando un aumento en su demanda, por lo que se percibe también una oportunidad de crecimiento en este mercado en el corto plazo (Zoryk y Sanders, 2023). La expansión de estos mercados verdes, junto con los anuncios de mecanismos de ajustes fronterizos de carbono, refuerza la importancia de que las acereras de la región se posicionen primero en estos mercados, logrando establecerse como una industria pionera en el acero libre de emisiones.

Políticas para avanzar en la descarbonización del sector del acero

La principal barrera para una rápida descarbonización son los altos costos que implican las políticas de mitigación en un mercado muy competitivo como es el del acero. La baja madurez de algunas tecnologías hace que las que actualmente son viables tengan costos elevados, mientras que la implementación de otras alternativas aún no es factible.

Se estima que el costo de inversión para una producción global baja en CO₂ será aproximadamente de entre USD 600 millones y USD 800 millones anuales. Si esta inversión fuera realizada en el reacondicionamiento del parque de hornos vigentes, alternativa sin reducción de emisiones, el costo sería aproximadamente de un tercio (MPP, 2021). Por otra parte, la inversión en una fábrica que permita la producción de acero verde es un 90 % más cara que la de una nueva planta convencional (MPP, 2022).

No solo el costo de renovación es una restricción, sino que, como ya se mencionó, las inversiones en capital en la industria acerera se realizan aproximadamente cada 20 años, por lo que en varios casos esto limitará la inversión en renovación de plantas que se encuentren lejos de su amortización total (MPP, 2022).

Las empresas que actúen primero en el mercado del acero verde tienen la ventaja de poder aprovechar los nuevos mercados ya mencionados, como lo es la creciente demanda de acero verde en el sector automotor. Sin embargo, actuar primero también implica costos elevados de inversión e insumos. El costo de producción está muy vinculado al precio de los insumos energéticos. Considerando las principales alternativas de descarbonización, el costo productivo de cada tonelada de acero puede ser entre un 15 % y



un 40 % mayor que con la ruta primaria actual (MPP, 2021). Estos mayores costos implicarán una prima para el acero verde. Por ello, será clave que siga expandiéndose la demanda de acero bajo en carbono, para que el diferencial de precios entre el acero tradicional y el acero verde no represente una desventaja competitiva para los actores que se muevan primero en este mercado.

En el largo plazo, se espera que esta prima vaya disminuyendo debido a un incremento generalizado en la demanda de insumos verdes, no solo en el transporte, sino también en la construcción y en la industria manufacturera. Bloomberg NEF estimó los costos por tonelada de acero para las principales rutas tradicionales y para los métodos con hidrógeno a partir de gas natural y electrolisis, así como la vía con captura y almacenamiento de carbono. Según esa estimación, para 2021 las tres rutas verdes son en promedio un 40 % más caras que las tradicionales, mientras que para 2050 la producción de acero verde costaría un 5 % menos que la producción tradicional (Roca, 2023).

Las políticas públicas y de organismos multilaterales deberán priorizar la superación de las barreras a la descarbonización y potenciar las oportunidades que se generen a partir de ella. Una de esas

políticas es el apoyo a la financiación de la inversión en fábricas de acero verde y en los insumos necesarios para la producción baja en CO₂. Tanto la construcción de plantas modernas como la producción de hidrógeno o la captura de carbono requieren grandes inversiones. Este apoyo podrá incluir préstamos específicos, garantías de crédito o incluso subsidios. Políticas nacionales o regionales que incentiven el hidrógeno verde impactarán en la transición del sector acerero. También será necesario que los gobiernos continúen avanzando en la descarbonización de la red eléctrica.

●● América Latina y el Caribe tiene potencial para convertirse en un exportador neto de acero verde

En el corto plazo, la prima por acero verde y la existencia de mercados para este producto serán el principal impulsor para la industria. Más allá de las iniciativas privadas ya mencionadas, puede ser de interés tanto para los gobiernos locales como para los bancos de desarrollo el fomento a la creación de estos mercados y la reducción de los costos del acero verde (AIE, 2020a; MPP, 2021).

Cuadro 6.2
Políticas para la industria del acero

Desafío	Objetivo	Políticas
Aumento en la demanda de acero y elevado consumo de combustibles fósiles como insumo energético	Desarrollo de una industria de acero verde	Promoción para el desarrollo de una industria de hidrógeno verde Apoyo en el financiamiento para renovaciones de hornos Fomento de polos industriales que permitan la producción de acero en zonas cercanas a las fuentes de producción de hidrógeno verde
	Mejoras de eficiencia en la producción primaria de acero	Apoyo financiero para la adopción de la mejor tecnología disponible
	Aumento de la producción de acero por la ruta secundaria	Inversión en educación y equipamiento para una mayor recuperación de chatarra

Industria química

La industria química es más compleja que la del cemento y el acero, dado que engloba varios insumos que son muy importantes para las economías. Entre ellos están el amoníaco (clave para los fertilizantes), el metanol (con múltiples usos como solvente, anticongelante, combustible o para la producción de formaldehído) y los productos químicos de alto valor (HVC, por sus siglas en inglés), de los que se deriva, por ejemplo, el plástico. Esta industria es la principal consumidora de petróleo y gas como insumo energético y para la producción de petroquímicos, lo que la convierte, a su vez, en la principal industria en términos de consumo energético. Dos diferencias importantes de las industrias del acero y el cemento con la industria petroquímica son que esta última tiene un consumo mucho menor de carbón y que gran parte del contenido de carbono de los insumos utilizados quedan almacenados en el producto final y solo son liberados en caso de su quema o descomposición.



La industria química es la principal consumidora de petróleo y gas como insumo energético

Amoníaco (NH₃)

El amoníaco es un importante insumo para la elaboración de fertilizantes y juega un rol primordial en la seguridad alimentaria (FAO, 2022). Cerca del 70 % del amoníaco producido se utiliza en abonos, mientras que el resto se emplea en plásticos, explosivos y fibras sintéticas (AIE, 2021a). Se estima que la mitad de la provisión de alimentos a nivel mundial depende de estos fertilizantes (Gabrielli et al., 2023), por lo que los crecimientos poblacionales proyectados, junto con el desarrollo de las economías emergentes, incrementarán la demanda de fertilizantes y, consecuentemente, de amoníaco.

La producción y consumo de químicos emiten GEI de tres formas. Primero, utilizando combustibles fósiles como insumo para la producción de plásticos, pesticidas y otros químicos; por ejemplo, el gas natural es el principal insumo para la síntesis del amoníaco. Segundo, consumiendo grandes cantidades de energía para la síntesis y elaboración de los productos finales. Y finalmente, algunas de las sustancias que se producen son potentes gases de efecto invernadero, como, por ejemplo, los hidrofluorocarburos, utilizados en refrigerantes y aerosoles.

En la etapa de producción, el amoníaco es el principal emisor de GEI y el compuesto con mayor intensidad de carbono (Pupo y González, 2023). Está seguido por el metanol, cuya producción ha mostrado el mayor crecimiento dentro de la industria química, aumentando más del 20 % entre 2015 y 2020 (Pupo y González, 2023). Finalmente, los HVC son los de menor intensidad de carbono, emitiendo cerca de 1 tonelada de CO₂eq por tonelada de este producto, menos de la mitad de la intensidad de carbono de los otros dos insumos químicos (Pupo y González, 2023).

Este compuesto también sirve como combustible libre de emisiones⁹. Si bien su utilización presenta limitaciones, principalmente en su distribución y en la adaptabilidad de los vehículos, esta restricción es menor para el sector marítimo, dada la existencia de infraestructura para el transporte y distribución de amoníaco en puertos (Krantz et al., 2020). Lo anterior podría causar un incremento de la demanda de amoníaco, que se sumaría al aumento esperado por la demanda de alimentos.

⁹ El compuesto químico del amoníaco es NH₃, por lo que la combustión de este químico no forma CO₂.

En el proceso de producción del amoníaco, más del 95 % del consumo energético proviene de combustibles fósiles (Pupo y González, 2023). La generación de las altas presiones y temperaturas necesarias para la producción de amoníaco se realiza a partir de combustibles fósiles (Pupo y González, 2023). Además, el gas natural, principalmente compuesto por metano (CH_4), es esencial para la síntesis del hidrógeno (H), el cual se utiliza como insumo clave en la producción de amoníaco. Es importante destacar que la producción de amoníaco utilizando hidrógeno como insumo

no genera CO_2 durante la síntesis. Sin embargo, la obtención de amoníaco también implica el uso de ácido nítrico (HNO_3), que, al ser producido, emite óxido nítrico (N_2O), un potente gas de efecto invernadero, así como NO_x , que son contaminantes del aire (IPCC, 2006). Por otra parte, el amoníaco puede someterse a un proceso de craqueocatalítico, generando hidrógeno y nitrógeno como subproductos (Pupo y González, 2023). Este hidrógeno resultante tiene un valor creciente como combustible tanto en la industria como potencialmente en el sector del transporte pesado.

Metanol (CH_3OH)

En la última década, el metanol ha sido el producto químico con mayor crecimiento en la producción, equivalente al 6,5 % anual (AIE, 2021a). Esto se explica por los diversos usos que tiene, principalmente en combustibles (30 %), pero también para la elaboración de plásticos, ácido acético, formaldehído y otros productos químicos, como los HVC (Pupo y González, 2023). La producción del metanol es intensiva en el uso de combustibles fósiles y suele estar localizada en países o regiones con manufactura petroquímica avanzada. En América Latina y el Caribe, se destaca Trinidad y Tobago, que en 2021 lideró el mercado global del metanol, siendo el principal exportador. Sus exportaciones de metanol ese año fueron de cerca de 4.000 millones de kg, representando el 15 % del total mundial para ese producto (Report Linker, 2023).

El metanol es producido principalmente a partir del gas natural (60 % de su producción). Esta ruta es la más eficiente dado el alto contenido de metano en este gas. Casi la totalidad de la producción restante de metanol se realiza a partir de carbón (39 %). En esta vía, la quema de carbón produce gas de síntesis que es convertido en metanol. Este método está siendo descontinuado porque es el de mayores emisiones de GEI (Pupo y González, 2023). Finalmente, existe una forma de producción a partir de fuentes renovables, pero solo representa un 1 % de la producción. En esta ruta los insumos principales son la biomasa (desechos agrícolas o forestales), el CO_2 capturado en otros procesos productivos y el hidrógeno obtenido con energía renovable (Pupo y González, 2023).

Productos químicos de alto valor (HVC) y el plástico

Los productos químicos de alto valor o HVC comprenden compuestos como el etileno, el propileno, el benceno, el tolueno y los xilenos. La demanda de estas sustancias está principalmente impulsada por la de plástico (Gabrielli et al., 2023). Sin embargo, las emisiones de GEI del plástico son mayores que las de los HVC, dada la intensidad energética que implica el proceso de transformación de esos compuestos en plástico (Gabrielli et al., 2023). A su vez, el plástico es el producto a granel más demandado desde la década de 1980 y con mayor crecimiento en la demanda.

El plástico emite GEI en cada etapa de su producción y ciclo de vida. La producción de resina de plástico a partir de combustibles fósiles representa cerca del 60 % de las emisiones de GEI vinculadas a este producto, mientras que la conversión del plástico en el bien final contribuye con cerca del 30 % de esas emisiones. Lo anterior se explica por el alto consumo energético que este proceso requiere. Finalmente, el restante 10 % corresponde a las emisiones en la etapa final de la vida del plástico, atribuidas a su manejo como residuo, y ocurren principalmente por su quema, aunque también existen emisiones relacionadas con

la descomposición del producto (OCDE, 2022; Zheng y Suh, 2019). Estas estimaciones no incluyen las emisiones fugitivas o emisiones de plásticos mal gestionados, los cuales continúan produciendo CO₂ durante su descomposición o su posterior combustión (OCDE, 2022; Zheng y Suh, 2019). Los plásticos, al descomponerse, generan microplásticos, que, además de ser contaminantes con potenciales daños en la salud de las personas y los ecosistemas, contribuyen al cambio climático. Existe evidencia reciente que sugiere que los microplásticos pueden interferir con la capacidad de los océanos de absorber y secuestrar carbono (Shen et al., 2020). En regiones del Ártico, donde no existe actividad humana aparente, se han detectado microplásticos que contribuyen a acelerar el calentamiento en dicha región, absorbiendo luz y reduciendo el albedo superficial de la nieve (Bergmann et al., 2022; Emberson-Marl et al., 2023; Lusher et al., 2015).

Si bien el sector destaca por su consumo energético y sus consecuentes emisiones de GEI, los mayores daños que causa se deben a su impacto medioambiental. Dentro del sector industrial, el sector

químico es el segundo en cuanto a emisiones de contaminantes del aire, siendo responsable de cerca de un tercio de las emisiones de SO₂ y casi un quinto de las emisiones de NO_x y MP_{2.5} (AIE, 2018b). Pero quizás el mayor perjuicio medioambiental generado por los productos químicos es la contaminación en el agua. Jambeck et al. (2015) estimaron que, en 2010, entre 5 Mt y 13 Mt de plásticos entraron en el océano, ocasionando diversos daños. Por ejemplo, los poliuretanos pueden causar eutrofización marina¹⁰, lo que afecta gravemente a los ecosistemas acuáticos, mientras que los cloruros polivinílicos (más conocidos como PVC) son cancerígenos para los humanos y, al ser ingeridos por los peces o filtrarse en los sistemas de agua potable, terminan siendo consumidos por las personas (OCDE, 2022).



El principal problema del plástico es su contaminación ambiental. El 10 % de las emisiones del plástico se generan en la etapa final de su vida útil

Tecnologías y políticas para la descarbonización de la industria química

Las políticas de descarbonización de la industria química deberán incluir una combinación de medidas tanto del lado de la oferta como de la demanda. Si bien esto también es cierto para la industria cementera y acerera, cobra aún mayor importancia en el sector químico por dos razones principales. Primero, porque globalmente la demanda de productos químicos seguirá creciendo en el camino hacia 2050 en la medida que son principalmente utilizados como insumos de bienes de alta demanda. Segundo, porque como ya se explicó, la mayor parte de la producción de estos compuestos depende de combustibles fósiles y no existen suficientes alternativas que permitan descarbonizar la oferta totalmente en el corto plazo.

En este sentido, las principales medidas de descarbonización están estrechamente vinculadas con la transición energética. Estas son la captura de carbono con utilización o almacenaje, el hidrógeno verde, la electrificación de los procesos productivos y la sustitución de insumos por otros no contaminantes. Dentro de las medidas del lado de la demanda, se destaca la circularidad y las políticas que limiten el uso de ciertos productos químicos, como, por ejemplo, la prohibición de plásticos de un solo uso. En este apartado se presentan las soluciones específicas al amoníaco, el metanol, los HVC y los plásticos, con foco en la transición energética. El capítulo 5 discute la industria del hidrógeno verde, mientras que el capítulo 10 dará más detalles sobre la captura de carbono.

¹⁰ La eutrofización marina es un proceso por el cual el ambiente acuático se enriquece con demasiados nutrientes, lo que genera un crecimiento excesivo de plantas y algas en estuarios y aguas costeras. Esta vegetación absorbe oxígeno del agua, lo que puede matar a peces y hierbas marinas y reducir los hábitats marinos esenciales (NOAA, s. f.).

En el caso del amoníaco, hay grandes avances. Dentro de los escenarios de descarbonización de la AIE, las medidas de eficiencia energética representan el 25 % de los esfuerzos de mitigación y la mayor parte de estos esfuerzos se realizarían antes de 2030. Estos incluyen la adopción de las tecnologías avanzadas disponibles, mejoras operacionales y, principalmente, la sustitución del carbón por gas natural u otros combustibles menos intensivos en carbono (AIE, 2021d). A su vez, la captura de carbono en el proceso de producción de amoníaco ya es común, por la propia necesidad de separar el CO₂ del hidrógeno en el proceso productivo (AIE, 2021d). Este carbono capturado es utilizado, junto con el amoníaco, para la producción de urea, insumo empleado principalmente en fertilizantes, pero también en algunos complementos alimenticios para animales y en la producción de plásticos. Sin embargo, no todo el CO₂ emitido se captura; una parte es liberado a la atmósfera. A su vez, parte del CO₂ capturado y utilizado en la producción de urea termina siendo liberado en la etapa de uso del bien final. Es posible aumentar la cantidad de CO₂ capturado y almacenado; sin embargo, esto requiere de inversiones adicionales para la propia captura y para el transporte del CO₂ a los depósitos (AIE, 2021d). Otros esfuerzos con potenciales significativos son la mejora en la eficiencia energética. Kermeli et al. (2017) muestran que inversiones en *software* para procesos de control en una planta en Australia generaron aumentos en la producción de amoníaco y reducciones en las emisiones de CO₂ y que dicha recuperación se logró en tan solo seis meses. Del lado de la demanda, el uso eficiente de los fertilizantes es clave tanto para la reducción en la demanda de amoníaco como para la reducción de los daños medioambientales por la filtración del nitrógeno (Smith y Martino, 2007).

En el caso del metanol, existen dos vías principales para la descarbonización en el corto plazo. La primera es la producción de biometanol, metanol producido a partir de biomasa. El biometanol puede utilizarse como combustible y reduce las emisiones de N₂O en un 80 %, las de CO₂ en el 90 % y las de SO₂ en un 100 %, además de mejorar la eficiencia energética del uso de combustibles si se utiliza junto con diésel o gas natural (Deka et al., 2022). Este combustible puede ser producido a partir de desechos de la silvicultura o la agricultura, así como de desechos municipales e industriales (IRENA, 2021). Otra alternativa es el metanol verde o e-metanol, el cual es producido a partir de bioenergía con captura de carbono (BECCS, por su

sigla en inglés) e hidrógeno verde (IRENA, 2021). Las principales limitaciones de ambas alternativas son los costos de producción, siendo el e-metanol significativamente más caro. Actualmente, se producen menos de 0,2 Mt de metanol renovable al año, mayormente biometanol (IRENA, 2021).

El plástico, por su parte, presenta más alternativas. La principal en el corto plazo es el reciclaje, en el sentido de que disminuiría la producción primaria de plástico y las emisiones en la etapa de desechos. Sin embargo, en el proceso de reciclaje existen emisiones de GEI por la descomposición del plástico y por el uso energético necesario para esa actividad. Existen dos alternativas principales para el reciclaje del plástico. La primera es el reciclaje mecánico, que es el método más conocido e implica la clasificación, lavado, molienda y reprocesado del plástico. Esta ruta es la de menos emisiones, dado que utiliza principalmente electricidad. Sin embargo, tiene una menor tasa de recuperación del plástico, puesto que no todos los desechos son regenerados. En el caso, por ejemplo, de las botellas de plástico, un aumento en el reciclaje mecánico podría reducir las emisiones entre el 9 % y el 14 % (Gracida-Alvarez et al., 2023). La alternativa es el reciclaje químico, el cual permite una mayor recuperación de los desechos, pero genera mayores emisiones. Gracida-Álvarez et al. (2023) estiman que un aumento en el reciclaje químico de las botellas de plástico no tendría reducciones netas de GEI. Uno de los potenciales del reciclaje del plástico es la quema para uso energético; sin embargo, esta alternativa, si bien reduce el uso de otros combustibles fósiles para la quema, libera GEI (Shen et al., 2020).

La sustitución de plásticos por otros materiales no es una opción que claramente implique reducciones de GEI. En algunos casos, el plástico es incluso un insumo que permitiría disminuir las emisiones, como en la industria automotriz, ya que hace posible reducir el peso de los vehículos y aumentar la eficiencia energética de estos (IPCC, 2023). Stefanini et al. (2021) comparan el impacto de las botellas de vidrio y plástico en las emisiones de GEI, el consumo de agua y la toxicidad, entre otros impactos, y concluyen que las botellas de plástico tereftalato de polietileno son la opción menos contaminante, exceptuando el impacto en lo que respecta a la contaminación del agua. Civancik-Uslu et al. (2019) muestran que, para el caso de las bolsas, existe una relación inversa entre el impacto en desechos y el impacto



medioambiental. Por ejemplo, las bolsas de plástico de un solo uso tienen un potencial mayor de terminar como un desecho que las bolsas de papel, mientras que esta relación se invierte si observamos las emisiones de CO₂. Finalmente, Helmcke et al. (2022) analizan el impacto de 14 productos de plástico comparándolos con su mejor alternativa no plástica. En ese análisis muestran que 13 de los 14 productos plásticos tienen menores emisiones de CO₂ que su alternativa no plástica y que existen pocas alternativas al plástico en determinados productos, como los de embalaje, siendo estos la principal fuente de desechos globalmente (Rosenboom et al., 2022). Es importante aclarar que el impacto está vinculado con el uso. Productos de un solo uso tienen mayores impactos medioambientales, principalmente como potenciales desechos (PNUMA, 2020b).

Otra alternativa al plástico son los bioplásticos, aunque la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2022) estima que estos materiales representarán únicamente un 0,5 % de los plásticos en 2060. El principal insumo para los bioplásticos son azúcares fácilmente fermentables, como la caña de azúcar, el maíz y los aceites vegetales comestibles. Estos productos tienen la clara desventaja de necesitar grandes extensiones de tierra para su cultivo, lo que competiría con la producción de alimentos y tendría potenciales emisiones de carbono por el uso de la tierra. A su vez, su producción es más cara que la de los plásticos tradicionales (Rosenboom et al., 2022). La ventaja de los bioplásticos es que tienen una menor huella de carbono, con un potencial de reducción de los GEI del 25 % de las emisiones actuales, en algunos casos son biodegradables y pueden ser integrados a la infraestructura existente de reciclaje (Rosenboom et al., 2022).

La electrificación, sustentada con generación de energía limpia, tiene un gran potencial para algunos procesos, como la conversión de resina de plástico al producto final y el reciclaje. Zheng y Suh (2019) muestran que, a nivel global, bajo un escenario de 100 % de energía renovable en 2050, las emisiones tanto de los plásticos basados en combustibles fósiles como de bioplásticos podrían reducirse a la mitad, comparando con un escenario donde la matriz energética no mostrara cambios hasta ese año.



El hidrógeno verde y la captura de carbono serán tecnologías clave para todas las industrias químicas

Finalmente, el hidrógeno verde y la captura de carbono serán claves para la descarbonización de este sector. El hidrógeno verde podría ser usado como reemplazo de combustibles fósiles y como insumo de ciertos productos químicos, como el metanol, el BTX¹¹ y el etileno-propileno (Pupo y González, 2023). En el caso del amoníaco, por ejemplo, cerca del 80 % de las emisiones del proceso productivo se generan en la obtención de hidrógeno (Lee et al., 2022), por lo que el reemplazo por hidrógeno libre de emisiones ofrece un enorme potencial para la producción de este químico. Esto crea también una oportunidad para los fabricantes de amoníaco, dado que la producción de este compuesto e hidrógeno verde podría tener sinergias. En el caso de la captura de carbono, la AIE proyecta que esta tecnología representará cerca del 40 % de la mitigación de GEI para 2050, pero, como ya se mencionó en apartados anteriores, aún no está suficientemente madura y la principal restricción es la de su elevado costo.

En América Latina y el Caribe, destaca Trinidad y Tobago dentro del sector químico, siendo responsable de cerca del 66 % de la producción de amoníaco y del 52 % de la producción de metanol. Esto se explica por el hecho de que este país cuenta con uno de los complejos de procesamiento de gas natural líderes a nivel mundial y utiliza más del 30 % de su capacidad en el procesamiento de amoníaco y metanol (Pupo y González, 2023). Trinidad y Tobago ha iniciado acciones hacia la descarbonización, con el proyecto NewGen, cuyo objetivo es contar con la planta de producción de hidrógeno con bajo contenido de carbono más grande del mundo, con un potencial de abastecer el 20 % de la demanda de hidrógeno de la mayor planta de producción de amoníaco (CariGreen, 2022; Jugessur et al., 2022). Además de las posibilidades de producción de hidrógeno verde, Trinidad y Tobago tiene un gran potencial para la descarbonización, por sus reservas de gas natural y su capacidad instalada para su extracción y comercialización, siendo este hidrocarburo un insumo

11 BTX se refiere a las mezclas de los hidrocarburos aromáticos: benceno, tolueno y los tres isómeros de xileno.

clave para la transición. Además, se puede convertir en un actor clave en el mercado de hidrógeno dado su rol como exportador neto de amoníaco y metanol, su inversión en energía eólica aguas adentro y la inversión en producción de hidrógeno verde (Jugesur et al., 2022).

Otra iniciativa de producción de hidrógeno y amoníaco verde se puede encontrar en Paraguay, con la inversión de ATOME. Esta iniciativa busca abastecer los mercados agrícolas y de fertilizantes del país y ser un exportador neto de fertilizantes verdes. Se espera que la primera planta esté operativa en 2025, mientras que la segunda se espera entre 2027 y 2028.

Cuadro 6.3 Políticas para la industria química

Desafío	Objetivo	Políticas
Aumento en la demanda de químicos y elevado uso de combustibles fósiles como insumo para la producción e insumo energético	Desarrollo de fertilizantes y combustibles sintéticos producidos a partir de hidrógeno verde	Promoción al desarrollo de una industria de hidrógeno verde
		Mayor utilización de la captura de carbono en procesos en los cuales la tecnología ya se encuentra madura, como es el caso de la producción del amoníaco
		Fomento de polos industriales que permitan la producción de químicos en zonas cercanas a las fuentes de producción de hidrógeno verde
Reducción de las emisiones y la contaminación del plástico		Mayores inversiones para educar sobre la importancia de la circularidad en el caso del plástico
		Regulación e impuestos a los plásticos de un solo uso
		Electrificación de la producción de pellets de plástico y del bien final

Tecnologías del futuro: oportunidades para la región

En este capítulo se ha mencionado que una de las principales limitaciones a la adopción de las tecnologías maduras son los elevados costos. Las industrias intensivas en carbono son muy competitivas y, sin la existencia de mercados con primas verdes para los productos descarbonizados, podrían perder esa ventaja si adoptaran estas tecnologías. Parte de esta lógica se explica por la no internalización de los costos ambientales que implica la producción industrial. Un precio al carbono que internalizara estas emisiones permitiría nivelar los costos y que algunas de las tecnologías mencionadas en este capítulo fueran económicamente viables (Rissman et al., 2020).

Sin embargo, los esfuerzos de corto plazo en América Latina y el Caribe no deberían estar en la descarbonización total de estas industrias, que enfrentan barreras difíciles de superar y en algunos casos altos costos de implementación. La región deberá, más bien, explotar las oportunidades que ofrezcan márgenes de mejora en eficiencia y que permitan modernizar su industria con un horizonte sustentable. La adopción de nuevos hornos eficientes en la industria cementera y acerera, el reemplazo de combustibles fósiles por biomasa y la puesta en marcha de iniciativas que promuevan el uso consciente de los fertilizantes, el cemento o los productos plásticos son algunas de las medidas de corto plazo que van en esa dirección. Al mismo tiempo, existen

nichos donde la región puede volverse fuerte y generar futuros mercados donde competir, como son la producción de hidrógeno verde, la producción de fertilizantes a partir de hidrógeno verde y los procesos de captura ya vigentes, y la producción de acero verde, el cual ya cuenta con un mercado, como el automotor, que paga fuertes primas por estos productos.

Si bien la existencia de un precio al carbono fomentaría la industria verde en todos los subsectores, este resultado no es por sí mismo un motivo que justifique un sistema de precios al carbono en la región, dado que el sector industrial no es uno de los principales en términos de valor agregado ni de emisiones de GEI. La mayor prioridad para los

gobiernos de la región deberá ser la modernización de los sectores industriales para aumentar su productividad, aprovechando la rapidez con la que se desarrollan las mejoras tecnológicas ya mencionadas en este capítulo. En este sentido, los gobiernos de la región deberán focalizar sus esfuerzos en políticas que ayuden a la formalización de estos sectores, fomentar la adopción de las mejores tecnologías disponibles, ya sea mediante acceso al financiamiento o subsidios, y una concientización centrada en el uso eficiente de los insumos de productos industriales. Estas políticas, si bien no tienen como objetivo central la transición energética, lograrían el desarrollo del sector industrial en la región y, como externalidad, la reducción de las emisiones de GEI y de los desechos industriales.

Figura 6.3
Avances en el establecimiento de estrategias a favor del hidrógeno verde



Fuente: Elaboración propia con base en Pupo y González (2023).

América Latina y el Caribe tiene un gran potencial para la generación de energías renovables e hidrógeno verde para proyectos de amoníaco con captura de carbono, para transitar hacia un uso de combustibles con menor contenido de carbono, como son el gas natural y la biomasa, y, eventualmente, para utilizar los yacimientos agotados de gas y petróleo para proyectos de captura y almacenamiento. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2023) destaca que la distribución geográfica de las industrias puede redirigirse hacia regiones con abundantes recursos renovables, con capacidades para captura y almacenamiento y con potencial de producción de hidrógeno verde, condiciones que América Latina y el Caribe cumple en su totalidad. Esto requerirá la implementación de políticas que ayuden a construir la infraestructura necesaria (eléctrica, vial, ferroviaria y portuaria), pero también la promoción de polos industriales que permitan aprovechar sinergias entre los sectores, como, por ejemplo, el acceso a la biomasa y al hidrógeno verde y a una correcta infraestructura para el transporte de carga. A su vez, es necesario el impulso a las industrias donde se observan desarrollos de mercados verdes.

Por ejemplo, proyecciones sobre el futuro económico de Brasil muestran que correctos estímulos a las inversiones verdes pueden modernizar y descarbonizar la industria manufacturera del país, lo que implicaría un 0,42 % más de crecimiento que si no se realizaran estas inversiones, con una reducción en las emisiones de CO₂ del 14,5 % (Gramkow y Anger-Kraavi, 2019). La AIE (2023I) destaca que la abundancia de recursos renovables sitúa a la región, principalmente a Argentina, Brasil, Colombia y Chile, como potenciales grandes productores de hidrógeno y combustibles de bajo costo y bajas emisiones, lo que, a su vez, puede potenciar su industria metalúrgica y química. El costo de producción de acero y amoníaco convencional en América Latina y el Caribe es similar al de las economías avanzadas, pero superior al de los países asiáticos en desarrollo. Sin embargo, el costo de producción de estos dos insumos utilizando hidrógeno es inferior al costo de los países asiáticos en desarrollo y al de las economías desarrolladas (AIE, 2023I).



América Latina y el Caribe tiene un gran potencial para la generación de energías renovables e hidrógeno verde y, eventualmente, utilizar los yacimientos agotados de gas y petróleo para proyectos de captura y almacenamiento

La región ya ha logrado los primeros avances en este sentido. La figura 6.3 muestra la situación en cuanto al establecimiento de estrategias en favor del hidrógeno verde. Seis países ya cuentan con proyectos operativos de producción de hidrógeno verde y todos ellos tienen proyectos en fase de desarrollo. A su vez, tres países más de la región han anunciado proyectos de producción de hidrógeno. A estos nueve países se agregan Panamá y Ecuador, los cuales cuentan con estrategias de desarrollo de hidrógeno verde, pero aún no han anunciado proyectos específicos (Pupo y González, 2023).