

# Hacia la economía del hidrógeno

## Perspectivas de la agenda internacional y las oportunidades locales

Julio Mateo y Mateo Suster

---

**Documento de Trabajo N° 7**

Mayo 2021

Cita sugerida: Mateo, J. y Suster, M. Hacia la economía del hidrógeno: perspectivas de la agenda internacional y las oportunidades locales. Documentos de Trabajo del CCE N° 7, mayo de 2021, Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación.

# Hacia la economía del hidrógeno: perspectivas de la agenda internacional y las oportunidades locales

Mayo 2021

---

**Julio Mateo y Mateo Suster**

ISSN 2718-8124

Corrección y diagramación: Natalia Rodríguez Simón y Juliana Adamow

Consejo para el Cambio Estructural

Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación

Julio A. Roca 651, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[info@produccion.gob.ar](mailto:info@produccion.gob.ar)

Los resultados, interpretaciones y conclusiones de esta obra son exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con la visión institucional del Ministerio de Desarrollo Productivo o de sus autoridades. El Ministerio de Desarrollo Productivo no garantiza la precisión de los datos incluidos en esta obra.

La serie de Documentos para el Cambio Estructural se hace circular con el propósito de estimular el debate académico y recibir comentarios.

## Autoridades

Presidente de la Nación

Dr. Alberto Fernández

Vicepresidenta de la Nación

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Jefe de Gabinete de Ministros

Lic. Santiago Cafiero

Ministro de Desarrollo Productivo

Dr. Matías Kulfas

Director del Centro de Estudios para la Producción XXI (CEP-XXI)

Dr. Daniel Schteingart

## Índice

Introducción .....	5
1. ¿Qué es el hidrógeno? .....	5
Usos y aplicaciones .....	5
El color del hidrógeno: características de la producción .....	8
La huella hídrica del hidrógeno .....	9
2. Producción y costos .....	10
Hidrógeno gris y azul .....	10
Hidrógeno bajo en carbono .....	11
3. El camino a la descarbonización .....	13
La transición energética en la industria del hidrógeno: del hidrógeno gris al verde .....	14
4. El hidrógeno en la agenda internacional .....	15
5. Nuestras ventajas competitivas .....	16
6. El impacto local de la producción de hidrógeno .....	20
7. Conclusiones .....	22
Referencias bibliográficas .....	23

## Introducción

El hidrógeno ha presentado en las últimas décadas un creciente interés como uno de los elementos que más podría contribuir en la transición energética desde los combustibles fósiles hacia alternativas más limpias. El rendimiento energético del hidrógeno, su disponibilidad y la no generación de emisiones de gases de efecto invernadero en la combustión determinan que tenga una enorme capacidad de transformar la matriz energética global.

La aceleración del aumento de la temperatura terrestre en las últimas décadas (que pone en riesgo la salud humana, ecosistemas, especies y sistemas productivos) llevó a la comunidad internacional a tomar crecientes compromisos de mitigación y adaptación al cambio climático, siendo el Acuerdo de París de 2015 el más destacado y cuyo objetivo es evitar un aumento de la temperatura global por sobre los 2° C con relación a los niveles preindustriales.

Alcanzar estos compromisos, de los cuales Argentina es signataria, presenta una serie de desafíos para la adaptación de los sistemas productivos a nivel nacional e internacional, al mismo tiempo que genera oportunidades para el desarrollo de nuevos sectores económicos vinculados con la economía verde.

En este escenario, la cadena de valor del hidrógeno tiene una perspectiva de gran crecimiento en las próximas décadas, y nuestro país cuenta con ventajas naturales y productivas para aprovechar el desarrollo de esta industria y su tecnología asociada, promoviendo el crecimiento de las exportaciones y el trabajo sostenible a largo plazo.

Este documento se estructura de la siguiente manera: en la sección I se revisarán las características del hidrógeno, sus denominaciones alternativas, usos y aplicaciones. En la sección II describiremos los procesos productivos utilizados para su obtención y los costos asociados. En las secciones III y IV analizaremos la relación del hidrógeno con la descarbonización y su relevancia en la agenda internacional. En la sección V discurriremos sobre las ventajas comparativas de nuestro país para la producción de hidrógeno y en la sección VI sobre los posibles impactos derivados de la producción local del mismo. Por último, la sección VII trazaremos las conclusiones del presente trabajo.

## 1. ¿Qué es el hidrógeno?

### Usos y aplicaciones

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en nuestro universo. Pese a ello, no se encuentra en forma aislada en grandes cantidades sino que principalmente se presenta en la conformación de otros elementos químicos como el oxígeno, el carbono y en compuestos químicos como el agua, el amoníaco o el metano. Ello permite que la producción de hidrógeno sea factible a partir de muchas fuentes y con distintos procesos de transformación, con impactos bien diferenciados en términos de emisiones de gases de efecto invernadero según sea obtenido a partir de fuentes renovables, o bien, del procesamiento del metano presente en los combustibles fósiles.

**Figura 1. Principales usos del hidrógeno**



La demanda de hidrógeno puro se ha más que triplicado desde los años 70, alcanzando actualmente unas 70 millones de toneladas anuales (IEA, 2019a). Más del 90% del hidrógeno se obtiene directamente a partir de combustibles fósiles: 76% a partir del gas natural –cerca de 205 mil millones de pies cúbicos– y casi la totalidad del restante a partir del carbón –principalmente en China–. En este sentido, aproximadamente un 6% del consumo global de gas se destina a producción de hidrógeno.

El principal destino del hidrógeno es su utilización para producción de amoníaco (en su mayoría para fertilizantes) y para la industria petroquímica –refinación de hidrocarburos– y la producción de metanol, el cual tiene diversos usos industriales y también interviene en la formulación de combustibles. Adicionalmente, tiene aplicaciones en la industria alimenticia, y la producción siderúrgica y metalúrgica. Si bien aproximadamente un tercio de la demanda de hidrógeno corresponde a la industria de la movilidad –dado su uso en combustibles– menos del 0,1% corresponde actualmente al abastecimiento de vehículos de celda de combustibles de hidrógeno (Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV). Sin embargo, la celda de combustible de hidrógeno tiene perspectivas promisorias en un conjunto amplio de aplicaciones.

La celda de combustible consiste en un reactor electroquímico que convierte la energía química de un combustible y un oxidante directamente en electricidad. A diferencia de los combustibles fósiles, como único subproducto de este proceso se obtiene vapor de agua. Entre los usos de la celda de combustible pueden destacarse aplicaciones en el transporte y movilidad, motores y energía estacionaria y otras vinculadas al transporte o vehículos autónomos (Deloitte, 2020).

Existe una amplia variedad de vehículos donde el hidrógeno se almacena comprimido en tanques para ser utilizado como combustible. En el caso de automóviles de pasajeros, buses o montacargas, su uso ya se encuentra comercialmente habilitado, mientras que en camiones de carga liviana y media, están aún en fase de demostración (testeos en gran escala). En el caso de camiones de carga de gran porte, actualmente se está en fase de desarrollo de producción.

Distintos países –como Estados Unidos, China, Japón o algunos de la Unión Europea– ya poseen vehículos alimentados con hidrógeno en circulación y se planean importantes metas para aumentarlos de cara al 2030. Una de las principales ventajas que poseen los FCEV frente a los vehículos eléctricos de batería (Battery Electric Vehicle, BEV) es que sus componentes son más livianos, lo cual

permite mejor competitividad para movilizar vehículos de gran porte. Además, la celda de combustible posee mayor autonomía y velocidad de carga. Una virtud estructural que posee el uso de la celda de combustible es que no necesita una estación de carga de batería y las estaciones de recarga de hidrógeno son similares a las convencionales.

También es posible el uso del hidrógeno en aviones, barcos y trenes, aunque tales aplicaciones no tienen por el momento tanta factibilidad como su uso en vehículos. Los trenes de celda de combustibles en base a hidrógeno son adecuados para distancias largas, en rutas de relativa baja frecuencia, con pocas paradas y rutas aún no electrificadas. En esas circunstancias, los trenes alimentados por hidrógeno pueden ser más competitivos que los eléctricos en cuanto a costos (Hydrogen Council, 2020). Existen varios proyectos con trenes operando en Alemania o Austria y otros en fase de análisis dadas las perspectivas de reducción de costos de celdas, tanques de almacenamiento y la proyectada caída del precio del hidrógeno.

En un estado más lejano se encuentran los avances en barcos en base a la celda de combustible de hidrógeno. Sin embargo, se espera que para antes de 2030 sean viables económicamente los barcos pequeños (con un requerimiento de motor menor a los 2 MW, como los ferries con capacidad para transportar el equivalente de 100 autos) y para 2035 los barcos de gran tonelaje (con motores con una potencia mayor a los 4 MW).

De igual manera, la implementación del hidrógeno en aviones es más realista en pequeños aviones (de hasta 20 pasajeros, donde la celda de combustible se encuentra siendo testeada) que en los grandes, donde la opción más viable es la de combustibles sintéticos que mezclen hidrógeno con kerosene sintético. La competitividad de esta tecnología dependerá de la infraestructura de las regiones, el costo de la electricidad, la reducción de los costos de la celda y del combustible de hidrógeno, entre otros.

Otra aplicación que posee el hidrógeno es su uso como calentador tanto en el sector industrial como residencial. En cuanto a su uso doméstico, las alternativas con las que el hidrógeno puede ser aplicado son las calderas o calentadores y las celdas de combustibles para la combinación de calor y energía.

Una de las ventajas que posee el hidrógeno (y una de las claves para lograr costos competitivos en este aspecto) es la posibilidad de ser transportado en las redes existentes de gas, por lo que podría utilizarse una infraestructura ya desarrollada. Si bien no es previsible que los costos del calentamiento por hidrógeno desplacen al gas en el medio término, esta aparece como la opción más viable para la descarbonización en este rubro.

Con respecto al calentamiento industrial, el calor obtenido a través de la quema del hidrógeno se presenta como una de las mejores alternativas para escalas industriales de media y alta temperatura (superiores a 400°C), frente a otras alternativas bajas en emisiones, como la biomasa o los combustibles fósiles con captura de CO<sub>2</sub>. Al igual que en las anteriores aplicaciones, la competitividad del hidrógeno versus las energías convencionales estará determinada por la evolución de sus costos (se necesitaría un precio de corte en torno a los 1,1 USD/kg para competir con el gas natural), aunque dicha ecuación podría mejorarse en favor del hidrógeno por la extensión de los mecanismos de *cap and trade*.<sup>1</sup>

También es posible utilizar el hidrógeno en la generación de energía eléctrica con destino industrial, dado que las turbinas de hidrógeno ofrecen una vía para balancear al sistema, así como brindar energía cuando la demanda aumenta. El hidrógeno puede tener un rol relevante en la provisión de flexibilidad en sistemas energéticos con bajas emisiones, tanto para balancear los picos de demanda de corto plazo que aparecen en distintas horas, o también en la generación en turbinas de ciclo combinado junto al gas en momentos donde la oferta de energía renovable es baja. En este sentido, el hidrógeno puede funcionar como un

---

<sup>1</sup> Enfoque regulatorio que combina restricciones cuantitativas a las emisiones con comercialización de derechos de emitir, con el objetivo de asignar eficientemente la reducción neta de emisiones.

amortiguador y una opción de almacenamiento energético en el largo plazo para el sistema eléctrico. El almacenamiento de grandes volúmenes de hidrógeno es posible a bajos costos y, en contraste con las baterías, el impacto del almacenamiento a lo largo del tiempo es más limitado.

## El color del hidrógeno: características de la producción

Existen diferentes procesos por los cuales se puede obtener hidrógeno. Como fuera mencionado, al presentarse el hidrógeno mayormente en otros elementos y compuestos químicos como el metano o el agua, su obtención involucra el procesamiento de los mismos a partir de distintas reacciones para lograr la separación del hidrógeno en forma pura. Estas técnicas son variadas y se encuentran en distintas etapas de desarrollo tecnológico y escala, pero entre ellas podemos señalar al reformado con vapor del gas natural, reformado con vapor de biocombustibles, gasificación del carbón, gasificación de la biomasa, electrólisis, pirólisis o separación termoquímica, entre otros.

El método de producción más difundido a nivel global es el reformado con vapor del gas natural, el cual representa al menos el 90% de la oferta global de hidrógeno y el 95% de la producción de hidrógeno en Estados Unidos (Office of Energy Efficiency and Renewables Energy (2021), siendo asimismo una de las técnicas de producción de hidrógeno con mayor impacto ambiental, junto con las de la obtención a partir de otros combustibles fósiles. En este sentido, la producción del hidrógeno a partir de combustibles fósiles genera emisiones de efecto invernadero equivalentes a las del Reino Unido e Indonesia combinados (equivalentes a 830 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año) (IEA, 2019a).

La necesidad de avanzar en la agenda de descarbonización de la matriz energética nos enfrenta a la paradoja de que impulsar el uso del hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles no implica necesariamente una reducción de emisiones de carbono en la medida en que la producción de hidrógeno no reduzca su impacto ambiental. De allí radica el creciente interés en la maduración de tecnologías alternativas existentes y el desarrollo de nuevas que permitan avanzar en la producción de hidrógeno neutro o libre de emisiones de carbono, y la mitigación de las emisiones de la producción tradicional.

A partir de ello, se comenzó a catalogar al tipo de hidrógeno producido en una serie de categorías según el proceso productivo que se trata y su impacto en términos de emisiones altas, bajas o neutras:

<b>Cuadro 1. Tipo de hidrógeno producido</b>				
<b>Proceso productivo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Nivel de emisiones</b>	<b>Denominación</b>
Gasificación del carbón	Reacción iterativa a alta presión y temperatura de carbón, oxígeno y vapor de agua.	Tecnología madura	Alto	Hidrógeno marrón o negro
Reformado de gas natural con vapor o reformado de metano	Reacción iterativa del metano presente en el gas natural a partir de vapor a alta presión y temperatura.	Tecnología madura	Alto	Hidrógeno gris
Reformado de gas natural o reformado de metano.	Proceso de reformado de gas natural con fase de captura y almacenamiento de emisiones.	Tecnología madura	Bajo	Hidrógeno azul

*Continúa en la página siguiente.*



**Cuadro 1. Tipo de hidrógeno producido (continuación)**

Proceso productivo	Descripción	Disponibilidad	Nivel de emisiones	Denominación
Pirólisis	Proceso de descomposición del metano a alta temperatura sin utilización de oxígeno o agua.	Disponible a baja escala	Bajo	Hidrógeno turquesa
Gasificación de la biomasa	Reacción a alta presión y temperatura entre el carbón, el oxígeno y el vapor de agua	Tecnología similar a reformado del gas natural pero aún disponible a baja escala	Bajo o neutro según el análisis de vida completo	No hay consenso sobre la denominación
Reformado de biocombustibles	Proceso similar al reformado de gas natural pero utilizando derivados líquidos de la biomasa (etanol o biodiésel)			
Electrólisis	Aplicación de corrientes de electricidad a una solución de agua para lograr la separación de la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno	Tecnología madura	El nivel de emisiones depende de la/s fuente/s de energía utilizadas	No hay denominación establecida
Electrólisis de fuente nuclear	Proceso de electrólisis con energía nuclear	Tecnología madura	Libre de emisiones	Hidrógeno rosa
Electrólisis de fuente renovables	Proceso de electrólisis alimentado exclusivamente de fuentes renovables	Tecnología disponible y en mejora de eficiencia para renovables	Libre de emisiones	Hidrógeno verde
Ciclos termoquímicos	Proceso por el cual se somete agua –a partir de un reactor solar– a altísimas temperaturas (500° / 1000° C) para lograr la separación de sus moléculas en hidrógeno y oxígeno.	Tecnología en desarrollo		
Fotocatalítica				

Las tecnologías disponibles no se limitan a las aquí descritas sino que se presentan las que al momento suscitan la mayor atención, ya sea porque son las tradicionales o presentan cierto grado de madurez y son escalables, o porque se encuentran en un proceso de desarrollo.

## La huella hídrica del hidrógeno

Uno de los mayores interrogantes en lo que refiere a la economía del hidrógeno es el consumo de agua y su disponibilidad para la producción. Sin embargo, el manejo de agua es una preocupación para distintas actividades productivas entre las cuales la generación de energía ya ocupa actualmente un lugar

relevante. En el continente europeo, por ejemplo, el 59% del agua utilizada se destina a la producción agrícola y ganadera, el 18% a la generación de energía y enfriamiento de centrales, y el 11% a la industria manufacturera (European Environment Agency, 2019), siendo la producción textil, la metalúrgica y siderúrgica y la industria del papel una de las mayores demandantes.

Los procesos productivos del hidrógeno presentan diferencias en el consumo según se trate de agua utilizada solo como materia prima (caso de la electrólisis alimentada con energía renovable), o bien, cuando se realizan los procesos de reformado o electrólisis alimentada con energía térmica o nuclear, en los cuales el agua forma parte tanto del proceso de generación del hidrógeno como para el enfriamiento de las centrales.

En este sentido, la producción directa de hidrógeno requiere entre 10 y 18 litros de agua por kilogramo producido (Webber, 2007), lo cual no es significativamente superior a lo registrado en la industria del gas y petróleo (Thirsty Energy II, 2016), con la salvedad de que el mayor impacto en la huella hídrica del hidrógeno se da en el agua requerida para la producción del reformado con vapor del gas natural y en el enfriamiento de las centrales térmicas que alimentan los procesos de electrólisis.

En igual sentido y a modo de comparación con lo que ocurre en otras industrias, el Ministro de Energía y Minas de Chile declaró en el evento *Hidrógeno en la Región Latinoamericana* que con el 1% del agua que se destina actualmente a la minería en dicho país se podría generar hidrógeno verde suficiente para reemplazar el diésel utilizado en todos los camiones de la industria (Revista Electricidad, 13 de junio de 2020).

De esta manera, los procesos de producción de hidrógeno alimentados por energías renovables, o bien, a través de fotoelectrocatalisis reducen sensiblemente las necesidades hídricas y, a diferencia de lo que ocurre en los procesos de producción y refinación de gas y petróleo, no generan agua residual sino que como subproducto solo se obtiene oxígeno.

Ello indica que en un escenario de sustitución de combustibles fósiles por hidrógeno obtenido de fuentes renovables no son esperables alteraciones significativas en la disponibilidad de recursos hídricos, a lo que se suma el impacto positivo de la reducción de emisiones sobre ríos y mares.<sup>2</sup>

## 2. Producción y costos

### Hidrógeno gris y azul

Como se mencionó, el gas natural es actualmente la principal fuente para la producción de hidrógeno y el reformado con vapor es el método más utilizado, principalmente en las industrias de amoníaco, metanol y refinación. El uso del gas natural es lo que causa que la producción de hidrógeno hoy genera significativas emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): alrededor de 10 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de hidrógeno en el caso del gas natural, 12 toneladas de CO<sub>2</sub> para el crudo y 19 toneladas para el carbón. La mayor parte de este CO<sub>2</sub> es emitido a la atmósfera, aunque en algunas plantas de amoníaco y urea los flujos de CO<sub>2</sub> provenientes del reformado con vapor de gas natural son capturados y reutilizados en la producción de fertilizantes de urea (alrededor de 130 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>).

---

<sup>2</sup> Los océanos son los grandes sumideros de dióxido de carbono, lo que impacta de forma directa provocando aumento de la temperatura de los mares, la reducción del oxígeno, y la acidificación de las aguas, afectando la flora y fauna y reduciendo la propia capacidad de continuar absorbiendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

La producción a partir del gas natural se puede realizar mediante tres métodos: el reformado con vapor (utilizando agua como un oxidante y una fuente del hidrógeno), oxidación parcial (usando el oxígeno del aire como oxidante) o una combinación de ambos llamado reformado autotérmico.

El reformado por vapor es usado para separar el hidrógeno del gas natural o, en menor medida, del gas licuado de petróleo o la nafta. El gas es utilizado tanto como combustible como materia prima, ambos diluidos con agua: cerca del 30% o 40% es combustionado para motorizar el proceso, mientras que el resto es el utilizado para la obtención del hidrógeno puro. Por su parte, la oxidación parcial extrae el hidrógeno de los fuel oil pesados y el carbón. En todos los casos, se forma una síntesis de gases compuestos por monóxido de carbono e hidrógeno, que luego puede separarse o no dependiendo del destino final del producto. Estos métodos son los procesos de producción más rentables y ampliamente usados en todo el mundo para la obtención del hidrógeno. Las ventajas económicas del reformado por vapor hacen que posiblemente continúe siendo el método más popular en el corto y mediano plazo.

Los costos de producción del hidrógeno a partir del gas natural están determinados principalmente por el precio del gas y los gastos de capital. El primer componente llega a abarcar entre el 45% y el 75% de los costos de producción en todas las regiones del mundo. Aquellas con bajos precios del gas, como Medio Oriente, Rusia o Estados Unidos, obtienen una ventaja frente a aquellas zonas que deben importar el gas, como Japón, Corea, China o India. En Medio Oriente, por ejemplo, se obtiene un costo de producción de hidrógeno sin captura de carbono menor a 1 USD/KgH<sub>2</sub>, mientras que en otras regiones los costos oscilan en el rango de 1,5-2,5 USD7KgH<sub>2</sub>.

Incorporar el proceso de captura de carbono conduce a que las plantas de reformado con vapor de gas incrementen, en promedio, un 50% sus costos de capital y un 10% su materia prima. Por su parte, los costos operativos tienden a duplicarse en promedio como resultado de transportar y almacenar el CO<sub>2</sub>. Existen varios métodos por los cuales se puede capturar el CO<sub>2</sub>, cuyos costos oscilan entre USD 53-80/TCO<sub>2</sub> en aquellas plantas que no se encuentran integradas con la producción de amoníaco o metanol y entre USD 90-115 /TCO<sub>2</sub> en las plantas integradas. Sin embargo, las regiones con mejores ventajas naturales poseen costos de producción de reformado con vapor y captura de carbono en el rango de 1,4-1,5 USD/kg H<sub>2</sub>.

## Hidrógeno bajo en carbono

Como fuera mencionado, actualmente solo una ínfima parte de la producción mundial de hidrógeno proviene de los procesos de electrólisis, tanto debido al rezago en la eficiencia técnica de la tecnología como a los bajos precios del gas natural. A grandes rasgos, existen tres tipos de electrolizadores que se pueden utilizar en la producción de hidrógeno: electrolizadores alcalinos, electrolizadores de membrana de intercambio protónico (Polymer Electrolyte Membrane, PEM) y las celdas electrolizadoras de óxido sólido (Solid Oxide Electrolysis Cells, SOEC).

La electrólisis alcalina es una tecnología madura y comercialmente difundida desde principios del siglo XX, con menor costo de capital con relación a las otras tecnologías, y capacidades operativas de carga de entre el 10 y el 100%. Sin embargo, gran parte de ellos fueron dados de baja con el auge y despegue del reformado con vapor de gas natural en los años 70s.

Los electrolizadores PEM fueron introducidos por primera vez en la década del 60 y tienen menor escala. En condiciones apropiadas, la capacidad de carga puede llegar hasta el 160% lo que permite ser más eficiente y dar lugar a almacenamiento de producción. Como desventaja, los electrolizadores PEM son más costosos por la necesidad de uso de materiales preciosos y presentan una menor vida útil que los alcalinos.

Los electrolizadores SOECs constituyen la tecnología menos desarrollada, no estando aún en fase comercial, pese a que algunas empresas están apuntando a llevarlos al mercado. Estos electrolizadores operan a altas temperaturas y con un alto grado de eficiencia eléctrica. Al usar vapor para la electrólisis, existe la posibilidad de recuperar una parte del calor para alimentar futuras electrólisis. A diferencia de los electrolizadores PEM's y alcalinos, la tecnología de los SOECs puede operarse para transformar el hidrógeno nuevamente a electricidad.

Por lo expuesto, los determinantes de los costos de producción del hidrógeno a partir de electrólisis de fuente renovable son los costos de capital de los electrolizadores, la capacidad operativa de los mismos, el precio de la energía y las horas anuales de operación. El aumento de la demanda de la energía debe asimismo ir acompañada de mayor capacidad instalada para evitar que la demanda se traslade directamente a precios afectando las mejoras de eficiencia que se logre en la tecnología. En este sentido, abastecer hoy toda la demanda mundial por hidrógeno a través de electrolizadores implicaría un gasto de electricidad de al menos 3.600 TWh, superando el total anual de la generación eléctrica de la Unión Europea (IEA, 2019a).

Considerando las distintas alternativas de tecnología expuestas, la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis requiere costos de electricidad que oscilen entre los 10 y 40 USD/MWh y entre 3.000 y 6.000 horas de carga total para ser competitivos con el hidrógeno azul. Por lo tanto, incluso en un escenario sin incentivos adicionales, en regiones con alta potencialidad en energías renovables la electrólisis es una opción competitiva, especialmente en países que son importadores de gas natural.

Cabe señalar que dichos rangos de precios no están por fuera de lo realizable en el corto y mediano plazo. En este sentido, en la Ronda RenovAR 2, adjudicada en 2017, los precios promedio de energía solar y eólica oscilaron entre 40 y 42 USD/MWh con proyectos eólicos incluso por debajo de los 40 USD/MWh. En México los precios de la energía eólica cayeron por debajo de los 20 USD/MWh y en Medio Oriente se adjudicaron proyectos de energía solar con precios inferiores a los 25 USD/MWh en Arabia Saudita y menores a 20 USD/MWh en Emiratos Árabes (IRENA, 2019).

Con relación a la disponibilidad de los recursos hídricos para el escalamiento de la producción, la utilización de agua proveniente del mar es otra alternativa viable en regiones desérticas o con estrés hídrico, aunque en ese caso hay que considerar el costo de desalinizar vía ósmosis inversa. Esta técnica requiere una demanda de electricidad adicional por metro cúbico de agua, aunque tiene un impacto menor en los costos de producción del hidrógeno (un encarecimiento de 0,01-0,02 USD/kg H<sub>2</sub>). Como contrapartida, el uso de agua del mar produce una desventaja operativa en la electrólisis por daños por corrosión en los sistemas productivos y la generación de cloro como subproducto.

En suma, del análisis de esta tecnología surge como resultado que los dos factores más relevantes que determinarán la competitividad de la electrólisis verde son las ventajas competitivas para la generación de energía renovable y el costo de capital de las plantas de producción. Dado que los precios de la energía renovable están asimismo directamente asociados al costo de capital, es notorio que la clave para alcanzar la competitividad en esta industria es el acceso a herramientas de financiamiento que permitan obtener el mejor prospecto para la amortización de los parques eólicos y solares, y las plantas de electrólisis.

### 3. El camino a la descarbonización

La descarbonización es una condición necesaria para poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y morigerar el crecimiento de la temperatura terrestre a los fines de evitar una mayor desestabilización de la situación climatológica global, teniendo como horizonte los objetivos del Acuerdo de París de evitar un aumento de la temperatura terrestre por encima de los 2°C con relación a la era preindustrial.

El proceso de descarbonización supone por un lado la reducción en la utilización de los combustibles fósiles como fuente de energía primaria y, por otro lado, la transición de la producción de energía eléctrica hacia fuentes de energía renovables. En otras palabras, es necesario reducir el consumo directo de combustibles fósiles en la industria, la movilidad y el hogar, reemplazándolos por energía eléctrica y/o combustibles alternativos, al mismo tiempo que avanzamos en producir dicha electricidad a partir de fuentes renovables.

En este sentido, según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2020b), el 58,5% de la energía primaria global provino del carbón y del petróleo, siendo responsables asimismo el uso de estos combustibles por el 78% de las emisiones de dióxido de carbono. En los países de la OCDE, que generalmente presentan políticas más activas de mitigación y adaptación, el 49,7% de la energía primaria en 2019 provino del carbón y del petróleo. El uso del gas –considerado un combustible de transición– representó el 22,8% de la energía primaria a nivel mundial y 29,1% para los países de la OCDE, en tanto que su combustión representó el 21% de las emisiones de dióxido de carbono. Con relación a la generación de energía eléctrica, en 2019 alrededor del 60% se produjo a partir de gas y carbón, en tanto que la generación a partir de fuentes renovables alcanzó un 25% (IEA, 2020a), incluyendo la hidroeléctrica.

Estos guarismos ilustran la gran transformación que la industria de la energía tiene por delante, para lograr fuentes primarias alternativas de energía y una generación de electricidad con mayor peso de las energías renovables. Siendo el hidrógeno un vector energético no fósil, fácilmente almacenable, con amplia disponibilidad de fuentes de obtención y diversidad de posibles aplicaciones, su protagonismo será muy significativo para aquellos sectores económicos donde la electrificación no es técnica o económicamente factible, como ser en el uso energético en proceso industriales, o en la movilidad de larga distancia en las cuales la electrificación directa no otorgaría soluciones factibles.

Al igual que ocurre con la producción de energía eléctrica, para garantizar que esta solución sea sostenible, la producción de hidrógeno debe atravesar también su propia trayectoria de descarbonización para transicionar desde el estándar tecnológico actual hacia alternativas con niveles de emisiones bajas o neutras.

Los costos del hidrógeno neutro/libre y bajo en emisiones de carbono terminarán determinando la velocidad y grado de avance de esta transición y el nivel de penetración efectivo en los sectores industriales y de la movilidad. Se vislumbra en las fases iniciales de la industria una etapa de tensión entre los objetivos de sustitución y uso mandatorio del hidrógeno para alcanzar el cumplimiento de metas de abatimiento de emisiones, con los mayores costos operativos que ello generará en algunos sectores productivos.

## La transición energética en la industria del hidrógeno: del hidrógeno gris al verde

Si bien la combustión del hidrógeno en los procesos de reformado con vapor de gas natural o carbón para su producción solo genera agua, estos son altamente contaminantes. Ello implica que la senda para la descarbonización debe incluir necesariamente un menor consumo energético vinculado al proceso de obtención del hidrógeno, reducción o mitigación de las emisiones de efecto invernadero resultantes del proceso productivo y tecnología asequible en términos económicos para obtener un precio del hidrógeno competitivo frente a otras alternativas.

Ello parecería indicar que las políticas tendientes a la construcción de mercados mandatorios y los subsidios destinados a la sustitución de combustibles fósiles estarán acompañados de requerimientos técnicos referentes al grado de emisiones asociados al ciclo completo de producción de hidrógeno, lo que determinará un precio mínimo al combustible y establecerá una nueva estructura de precios para los sectores productivos alcanzados por los objetivos de descarbonización.

La escala y tecnología disponible nos hacen vislumbrar que el hidrógeno azul será el gran impulsor del crecimiento del mercado en el corto y mediano plazo, dado que la probada tecnología del reformado con vapor del gas natural puede garantizar un rápido crecimiento de la oferta en el corto plazo, y la tecnología ya disponible de captura y almacenamiento de las emisiones de efecto invernadero reducen sensiblemente su impacto ambiental, haciéndolo una alternativa asequible y con un nivel de emisiones morigerado.

Para la constitución de un mercado de hidrógeno a escala global deben conciliarse los incentivos al uso del hidrógeno a nivel local, con esquemas que promuevan la producción y el comercio internacional de este combustible, junto con instancias de cooperación multilateral que deben propiciar el desarrollo de tecnología de producción de hidrógeno verde y garantizar su trazabilidad, para contribuir a la baja de costos que permitan una transición suave entre el hidrógeno azul y el verde, y el efectivo cumplimiento de las metas de mitigación.

La temprana constitución de los mercados internacionales de hidrógeno permitirá que la vía a la descarbonización sea la más eficiente en términos ambientales, económicos y sociales, al permitir un acceso a los mejores precios de este combustible, el cual depende directamente del costo de producción de la energía que se use para la producción, ya sea el gas natural o las energías renovables.

Dado que los costos de la energía representan hasta un 70% del precio del hidrógeno, los países que cuentan con el mejor acceso a estas fuentes de energía son los mejores posicionados para promover el crecimiento de la oferta con los precios más competitivos. Sin embargo, la escasez de capital, las barreras comerciales y obstáculos técnicos, y los problemas de trazabilidad determinarán la efectiva velocidad del crecimiento de la oferta de hidrógeno neutro/libre y bajo en emisiones de carbono. Los riesgos de demorar la consolidación del mercado internacional frente al incremento de la temperatura terrestre tendrán como resultado un elevado costo económico y social frente a un punto de inflexión que obligue a acelerar la velocidad de adaptación de los sistemas de producción.

## 4. El hidrógeno en la agenda internacional

La transición ecológica está en la agenda de las principales economías mundiales, entendida tanto como una necesidad de adaptar y mitigar el cambio climático, como también una estrategia para el desarrollo de nuevos negocios y sectores económicos, y una herramienta para la construcción de consenso y política internacional. La ratificación del Acuerdo de París por más de 180 naciones muestra el alto nivel de relevancia que esta agenda adquirió en el escenario internacional, y reflejo de ello es también que su denuncia sea el objetivo preferido de los dirigentes políticos asociados con el negacionismo del cambio climático.

En este contexto, la exploración de alternativas e impulso al uso de nuevos combustibles forma parte central de la política energética de los países más industrializados, al mismo tiempo que se impulsan los desarrollos en tecnologías orientados principalmente a mejorar la escala y eficiencia de los equipos destinados a la producción de hidrógeno verde, con foco en la electrólisis.

Por lo menos una veintena de países han comenzado a trazar sus estrategias con relación a esta industria, incluyendo al bloque de la Unión Europea, Reino Unido, China, India, Japón, Rusia y, recientemente, Estados Unidos y también países con potencialidad de producción de hidrógeno verde como Chile y Marruecos. Con relación a ello, se ha identificado que los mayores objetivos de política incluyen incentivos al uso del hidrógeno en vehículos livianos y camiones, flotas de transporte público, objetivos de uso en hogares e industria y producción de hidrógeno a partir de electrolizadores. Incluso durante la administración Trump, el departamento de Energía de Estados Unidos anunció un fondeo de 100 millones de dólares para el desarrollo e investigación en celdas de hidrógeno (Department of Energy, 2020), en tanto que la Unión Europea estableció su estrategia del hidrógeno (European Commission, 2020) con objetivos en producción, movilidad y transporte pesado, aéreos y ferroviario, entre otros, que demandará una inversión de 430 mil millones de euros y fondeo de asistencia por 145 mil millones de euros a 2030 (Hydrogen Europe, 2021).

Al mismo tiempo, algunos de los grandes productores de petróleo como Rusia, Arabia Saudita, China y Canadá están avanzando en el diseño e implementación de sus estrategias de reconversión energética en los cuales el hidrógeno será protagonista tanto para consumo doméstico como para exportación. En este sentido, las estrategias incluyen avanzar en la producción del hidrógeno azul con base en su abundancia de gas natural en el corto y mediano plazo, en la medida que se avanza en la estrategia de desarrollo del hidrógeno verde. Arabia Saudita en particular tiene por objetivo una inversión de 5.000 millones de dólares para poner en marcha una planta de hidrógeno verde alimentada por energía solar y eólica en 2025, y continuar teniendo en 2050 una preeminencia sobre el mercado mundial de la energía a partir del hidrógeno (World Oil News, 7 de marzo de 2021).

Si bien las estimaciones son muy disímiles con relación a cuál podría ser el volumen del mercado mundial de hidrógeno, el Consejo del Hidrógeno (Hydrogen Council, 2017) considera que a 2050 el hidrógeno en sus diferentes presentaciones puede alcanzar el 18% de la demanda final de energía, generar un mercado de 2,5 billones de dólares entre ventas de hidrógeno y equipamiento para su producción y aplicación, y la creación de más de 30 millones de empleos directos e indirectos. Otras fuentes (Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2020) estiman que el volumen del mercado de exportación de hidrógeno verde podría ser de alrededor de 300.000 millones de dólares. Para lograr esta transición, se requiere un nivel de inversiones en el orden de 20.000/25.000 millones de dólares anuales, un 15% de las inversiones anuales en la industria de la energía.

El banco de inversiones Goldman Sachs (2020), por otro lado, estima un escenario de aceleración de la transición hacia la economía del hidrógeno mucho más agresivo, que solo en Europa implicará a 2050 una capacidad de generación renovable de al menos 350 GW y 500 GW de capacidad de electrólisis, renovación de toda la infraestructura de gasoductos y extensión de vida útil de plantas de generación

térmica con conversión a tecnología del hidrógeno, lo que representaría un valor en activos fijos no inferior a 2,2 billones de euros en 30 años. En este escenario, se estima que casi el 100% del abastecimiento energético en Europa sea renovable, incluyendo generación térmica a partir de hidrógeno.

El alto consumo de energía doméstica en países que podrían ser grandes productores como los Estados Unidos y China hace que su capacidad exportadora esté limitada, y que incluso, puedan requerir de importaciones para suplir su demanda local. Un estudio de Strategy& (2020), consultora de negocios de la firma PricewaterhouseCoopers, proyecta el siguiente escenario de potencialidades para el mercado del hidrógeno verde:

#### Exportadores netos:

- Península Arábiga
- Australia
- Canadá
- Chile
- Argentina

#### Con autoabastecimiento:

- Estados Unidos
- China
- India
- Brasil

#### Importadores netos:

- Japón
- Corea del Sur
- Reino Unido
- Alemania
- Italia
- Francia

Así como el desarrollo del petróleo no convencional ha alterado las relaciones comerciales en el mercado internacional del crudo, principalmente en lo referente a la posición de los Estados Unidos, la consolidación del hidrógeno modificará la gravitación de las empresas de gas y petróleo y de los países productores, lo cual se verifica en el creciente interés que tienen los países de la Península Arábiga<sup>3</sup> en la transición hacia las energías renovables y la producción de hidrógeno para mantener su posición de liderazgo.

Las ventajas naturales para la producción de energía eólica y solar, la disponibilidad de biomasa y las reservas de gas natural hace que nuestra región también cuente con las capacidades suficientes para tener una elevada relevancia en el nuevo escenario energético internacional como exportadores de hidrógeno verde.

En particular la Argentina cuenta con muy alta potencialidad en términos de disponibilidad de recursos para la producción de los distintos tipos de hidrógeno, considerando de forma combinada las reservas de gas natural no convencional para la producción de hidrógeno azul y el acceso a fuentes renovables de energía para la producción de hidrógeno verde. En igual sentido, Chile ha planteado una estrategia muy relevante para adoptar un posicionamiento muy activo como proveedor de hidrógeno renovable a partir de la producción de energía eólica en la Patagonia y solar en el desierto de Atacama. Brasil, por su parte, también ha señalado su interés en la producción del hidrógeno verde a partir de energía solar y de su alto potencial eólico en el nordeste.

## 5. Nuestras ventajas competitivas

Argentina cuenta con numerosas ventajas competitivas para posicionarse en el mercado mundial del hidrógeno. Además de contar con las naturales, en términos de recursos renovables y reservas de gas natural, posee una tradición industrial de proveedores de la cadena del gas y el petróleo, algunos de los cuales han logrado una exitosa internacionalización –como el caso de la industria del GNC–, fue pionera

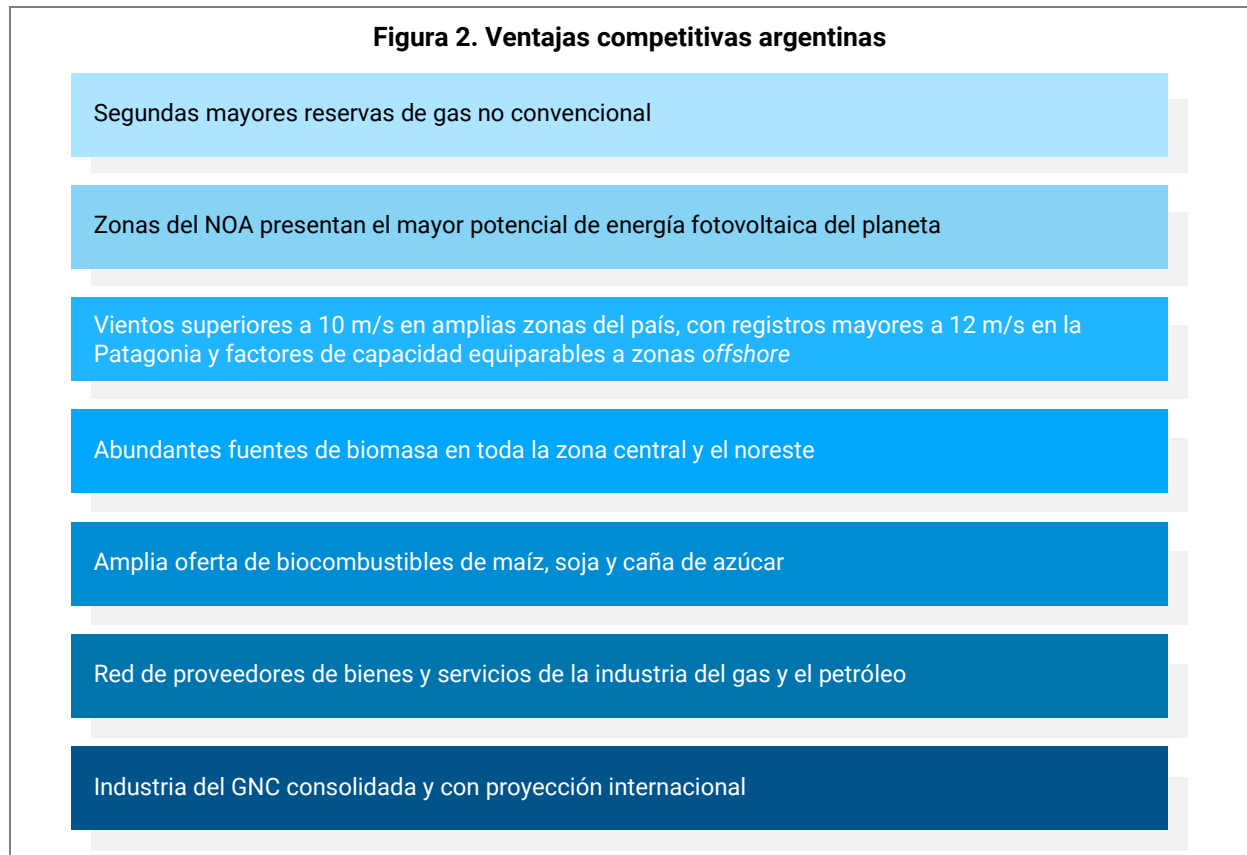
<sup>3</sup> Arabia Saudita, Bahrein, Kuwait, Omán, Qatar y Emiratos Árabes Unidos.



en establecer un marco normativo para la promoción del hidrógeno y cuenta con un proyecto de producción de hidrógeno verde que opera desde 2008.

Además de sus yacimientos de gas natural convencionales, nuestro país cuenta con las segundas mayores reservas mundiales de gas no convencional, con un volumen estimado de 308 trillones de pies cúbicos, concentradas en la región patagónica. En igual sentido, cuenta con una extensa red de gasoductos de más de 16.000 kilómetros de extensión que abastecen las principales zonas urbanas e industriales del país.

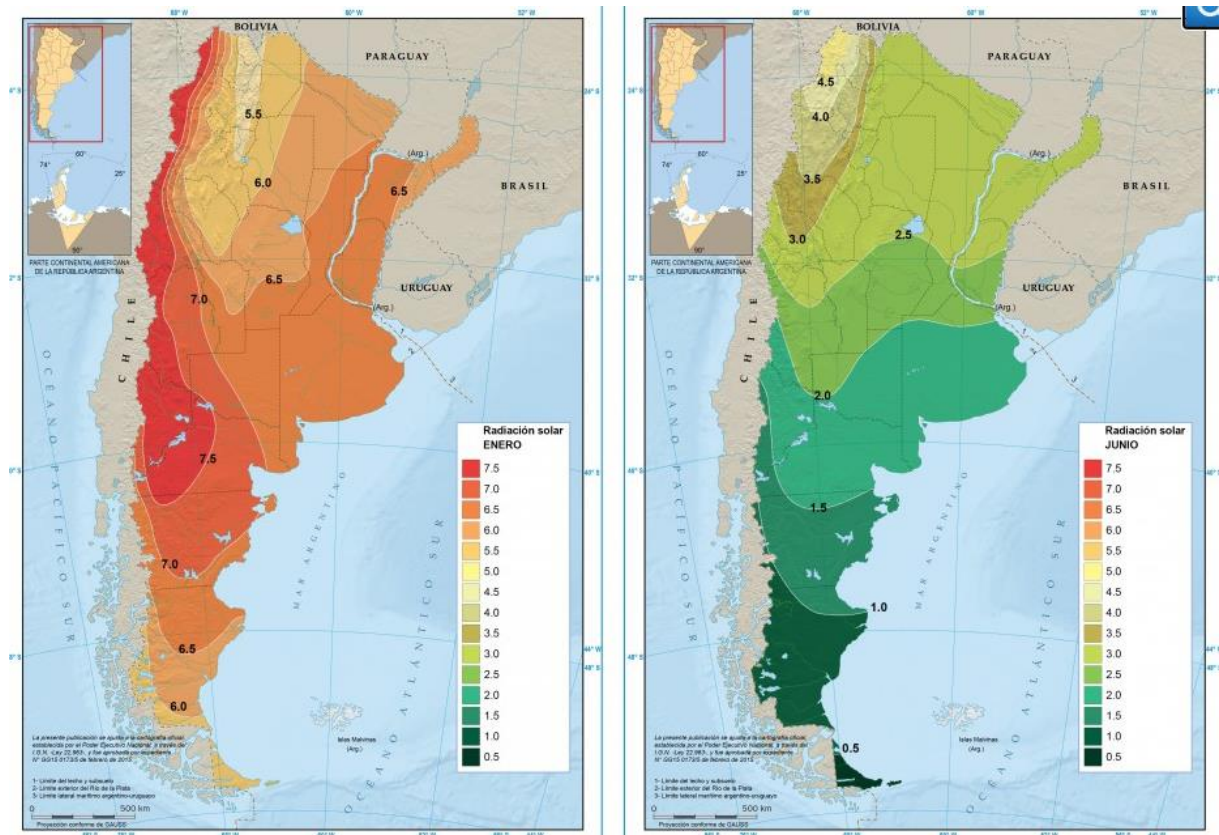
**Figura 2. Ventajas competitivas argentinas**



En relación con los recursos renovables, Argentina presenta condiciones muy favorables para la producción de energía fuente solar, eólica, hidráulica, y cuenta con enorme disponibilidad de biomasa. Sin contar esta última, el potencial de Argentina para la producción de energía eléctrica de fuente renovable –sin contar biomasa– podría exceder los 300 GW.

En lo que refiere a la energía solar, que puede ser aprovechada para distintas tecnologías de producción de hidrógeno, la zona andina cuyana y del noroeste argentino comparte con Chile, Bolivia y Perú el área con el mayor potencial de energía fotovoltaica a nivel global –según el Banco Mundial (The World Bank, 2020)– incluso con niveles de radiación levemente superiores a los registrados en otras áreas con climatología desértica como el norte de África o la Península Arábiga. En dicha zona se encuentra en la provincia de Jujuy el parque solar Caucharí, la segunda instalación fotovoltaica en operaciones más grande de América Latina.

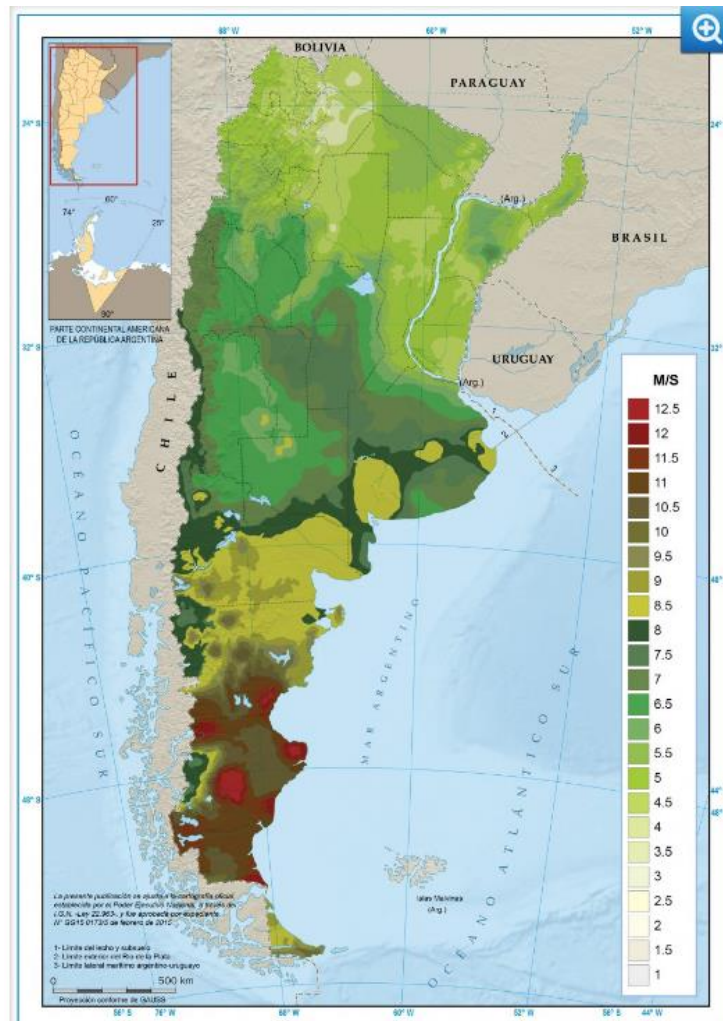
Figura 3. Mapa de radiación solar, enero (izquierda) y junio (derecha)



Fuente: Energía de mi País - EducAr - Fundación YPF.

Similar es la situación que se presenta en para la producción de energía eólica en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires y la Región Patagónica. Mientras que a nivel internacional la mejora tecnológica y el aumento de capacidad de las turbinas eólicas ha logrado mejorar los factores de capacidad de hasta 35% en México y Estados Unidos, y levemente por encima del 30% para el norte de Europa (IEA, 2019b), los factores de capacidad de la Patagonia argentina están en el rango del 40-45%, con algunos parques que alcanzan niveles de entre el 50 y el 60%. En este sentido, la potencialidad en la región más austral del país es similar a la alcanzada en las explotaciones *offshore* del Norte de Europa.

Figura 4. Mapa de velocidad de vientos



Fuente: Energía de mi País - EducAr - Fundación YPF.

La oferta de biomasa, por su parte, está ampliamente extendida en toda la zona centro y noreste del país. La zona centro es muy relevante por la altísima generación de componentes orgánicos provenientes de la industria de procesamiento de alimentos, y residuos urbanos que surgen de la alta concentración poblacional de la zona. En la zona noroeste y litoral, asimismo, también es relevante la generación de biomasa derivada de la actividad forestal.

Por otro lado, Argentina tiene una extensa disponibilidad de recursos para la producción de biocombustibles, entre los cuales sobresale la producción de biodiesel a partir de aceite de soja, etanol de maíz y etanol de caña de azúcar, que podrían ser aprovechadas para la obtención de hidrógeno a partir del método de reformado de biocombustible, una tecnología en proceso de desarrollo y aumento de escala.

Asimismo, la disponibilidad de recursos hídricos a nivel nacional garantiza que haya el abastecimiento suficiente para las plantas de hidrógeno renovable. Como fuera mencionado anteriormente respecto al consumo de agua para la producción de hidrógeno renovable con relación a los combustibles fósiles, las zonas con potencialidad para la producción de hidrógeno verde se encuentran en áreas de influencia de producción de gas y petróleo, donde ya existe disponibilidad probada de suministros.

De esta forma, queda claro que a partir de nuestros recursos naturales tenemos capacidad para ser un jugador importante en el mercado mundial de hidrógeno como oferentes tanto de hidrógeno azul como de hidrógeno verde. Como fuera mencionado anteriormente, dada la estructura de costos del hidrógeno, el precio de la energía es el factor fundamental que determina su competitividad, a partir de lo cual dada nuestra amplia y diversa oferta de recursos renovables y no renovables, podremos obtener un hidrógeno que sea competitivo en términos internacionales.

Es notable también que a diferencia con lo que pasa con otras fuentes de recursos naturales, la capacidad de que el hidrógeno sea producido a partir del gas natural, la energía eólica o la energía solar, otorga la posibilidad de generar una dinámica de producción mucho más federalizada y donde sea compatible obtener los costos de producción de energía más baja, la cercanía con los centros de consumo, distribución y exportación, y el acceso a los recursos hídricos necesarios para el caso de la electrólisis u otros procesos que sean a partir del agua.

## 6. El impacto local de la producción de hidrógeno

Resulta evidente que nuestro país tiene la oportunidad de ser protagonista en un nuevo sector productivo que se consolidará como uno de los más relevantes y dinámicos de la economía descarbonizada, y con una capacidad de crecimiento muy amplia en función del avance de la transición energética.

A diferencia de otros sectores económicos basados en ventajas naturales, la disposición de los recursos en distintas latitudes del país hace que el hidrógeno pueda ser un recurso con un impacto federalizado y que, a diferencia de otros recursos naturales, su matriz de crecimiento sea preeminentemente a partir de fuentes renovables.

Las limitaciones que evidentemente se presentan para la dinámica de esta industria en los países de ingresos medios surgen de la necesidad de obtener financiamiento que permita la realización de inversiones y los impactos locales. En este sentido, como fuera mencionado esta industria requiere enormes flujos de capital para desarrollar nuevos mercados y tecnologías de producción. En nuestro caso particular, las limitaciones que enfrentamos de acceso al financiamiento internacional podrían reducir en el corto plazo las perspectivas de crecimiento de la industria a nivel local.

Sin embargo, las instancias de cooperación internacional como las previstas en organismos multilaterales y en el seno de la Unión Europea serán claves para poder facilitar las inversiones en nuestro país y la reducción del costo del capital necesario para la radicación de inversiones y los acuerdos comerciales con potenciales socios.

Las necesidades de capital no solo refieren al aumento de capacidad instalada para la producción de los diferentes tipos de hidrógeno y la absorción y almacenamiento de emisiones, sino también a la mejora de infraestructura de transporte y acceso a zonas de producción, la red de gasoductos, la multiplicación de la capacidad de generación de energía renovable y el manejo de los recursos hídricos en las zonas de producción a partir de electrólisis.

A diferencia de otras industrias basadas en recursos naturales, la producción de hidrógeno verde en particular no tiene un impacto negativo sobre el entorno ambiental ni humano y no genera depredación de recursos ni alteraciones significativas sobre su zona de influencia, lo que tiene una enorme relevancia a medida que aumenta la conciencia social a nivel nacional e internacional sobre el impacto de las actividades económicas en el ambiente.

Más allá de las fases de producción, el hidrógeno requiere ser sometido a procesos de transformación y compresión para poder ser almacenado y transportado. Los aumentos de los volúmenes de producción y transporte y uso a nivel global generarán una gran demanda de equipos de distinto porte para la distribución del combustible y su uso en el punto final. Ello incluye tanto vehículos de carga, tanques, compresores, caudalímetros, software y equipos de precisión sumado a la demanda de bienes y servicios para el uso final del hidrógeno como todos los componentes para estaciones de carga, además de toda la demanda de autopartes y celdas para la propia producción de los vehículos cuyo combustible será el hidrógeno.

En este sentido, nuestra industria tiene antecedentes en la producción de componentes para la industria del gas y petróleo, y la industria del GNC por lo cual podría posicionarse en distintas fases de la cadena de valor como la provisión de equipos de compresión y bombeo y sus partes, material de transporte o equipos de precisión y medición. Adicionalmente, nuestros avances en la producción de baterías, celdas y membranas nos permitirían explorar opciones de abastecimiento en las distintas fases de la cadena del hidrógeno, tanto en componentes de electrolizadores como en material de transporte, y motores estacionarios.

Por último, la pujante industria de la economía del conocimiento puede ser un actor destacado en la cadena de valor local del hidrógeno. La digitalización del mercado de la energía, del control y mantenimiento de los aerogeneradores y paneles solares, y de todo el proceso en desarrollo para la producción del hidrógeno, desde la operación de los electrolizadores hasta el almacenamiento y transporte garantiza una ventaja de oportunidades para el abastecimiento local de servicios basados en el conocimiento.

Las diferentes proyecciones sobre la dimensión del mercado del hidrógeno dificultan establecer un escenario base para proyectar nuestra capacidad de penetración en dicho mercado. Sin embargo, si se cumplieren las previsiones más conservadoras sobre el mercado de exportación, y Argentina lograra una penetración en el mismo hacia 2050 de entre el 2,5 y el 5% –factible en términos de nuestra capacidad de generación de energía renovable–, podríamos atraer un volumen de inversiones de por lo menos 100.000 millones de dólares y generar exportaciones por más de 15.000 millones de dólares anuales, similares a las registradas para el complejo sojero en 2020 (INDEC, 2021).

La generación de empleo asociada a este volumen de inversiones depende de muchos factores, como el grado de integración nacional asociado a los bienes de capital, el tipo de hidrógeno del que se trate, la fuente de generación de energía y las cadenas de valor afectadas. Sin embargo, se puede estimar que el empleo asociado a esta industria podría superar los 50.000 trabajadores en los distintos sectores de actividad.

Desde el punto de vista de los desafíos para lograr el crecimiento de la industria en el país, el mayor reto podría estar vinculado a dificultades de acceso al financiamiento internacional en la y las restricciones para este tipo de financiamiento en la plaza local, y a la mejora de la percepción del riesgo argentino por parte de inversores o fondos privados que cuenten con financiamiento propio. Los mecanismos de cooperación internacional concertados en tratados multilaterales –como el Acuerdo de País– que promueven la transición justa y la transferencia tecnológica internacional, el funcionamiento transparente de los mercados internacionales y un marco normativo propicio podrían ser la clave para acelerar el crecimiento de esta industria en Argentina y promover un mayor nivel de inversiones.

## 7. Conclusiones

La agenda de transición energética ha tomado a nivel internacional una dimensión que involucra todos los aspectos de la planificación de la política pública, incluyendo desde el diseño de los mecanismos de cooperación internacional, los procesos productivos y las prácticas comerciales. Asimismo, el interés en la misma ya no está solo limitado a los países centrales sino que es una prioridad en potencias emergentes y economías de medianos y bajos ingresos en todas las latitudes.

En este escenario, la economía del hidrógeno ha dejado de ser una utopía de la transformación económica. Por el contrario, es parte de una necesidad de adaptación de nuestro sistema productivo para no poner en mayor riesgo las propias bases que sustentan nuestros recursos y permiten el crecimiento de la economía.

Nuestro país posee muchas ventajas para ser protagonista de esta nueva economía, tanto por sus recursos naturales altamente competitivos, como por el nivel de su capital humano y sus antecedentes en la provisión de bienes y servicios para la industria de la energía, además del creciente interés de sus ciudadanos en una economía basada en sectores productivos con menor impacto ambiental.

La estabilización de las variables económicas locales y el proceso de normalización de la macroeconomía y de los compromisos externos permitirán sentar las bases para favorecer las inversiones en el sector de la energía, y en particular en el del hidrógeno, el que requerirá de un marco normativo adecuado para su crecimiento.

La comunidad internacional debe asimismo cumplir sus compromisos y consensuar las reglas de juego que garanticen el acceso a financiamiento y tecnología, y alcanzar la consolidación de un mercado del hidrógeno abierto y transparente, teniendo como horizonte al hidrógeno verde pero entendiendo que en el camino la transición energética será multicolor.

## Referencias bibliográficas

- Deloitte (2020). Fueling the Future of Mobility - Hydrogen and fuel cell solutions for transportation.
- Department of Energy (2020) - DOE Announces New Lab Consortia to Advance Hydrogen and Fuel Cell R&D. Energy.gov.
- European Commission (2020) - Sustainable and Smart Mobility Strategy - Putting European Transport on Track for the Future. Bruselas, diciembre.
- European Environment Agency (2019). Use of freshwater resources in Europe.
- Goldman Sachs (2020). Green Hydrogen - The Next Transformational Driver of the Utilities Industry.
- Hydrogen Council (2017). Hydrogen Scaling Up - A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition.
- Hydrogen Council (2020). Path to Hydrogen Competitiveness - A Cost Perspective.
- Hydrogen Europe (2021). Green Hydrogen Investment and Support Report - Hydrogen Europe input for a post Covid-19 Recovery Plan.
- IEA (2019a). The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities. International Energy Agency.
- IEA (2019b). Wind TCP Annual Report. International Energy Agency.
- IEA (2020a). Global Energy Review 2020 – Renewables. International Energy Agency.
- IEA (2020b). Key World Energy Statistics 2020. International Energy Agency.
- INDEC (2021). Complejos Exportadores año 2020. *Informes técnicos Comercio Exterior*, 5(4). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- IRENA (2019). Renewable Energy Auctions - Status and Trends Beyond Price. International Renewable Energy Agency.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile (2020). Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde.
- Office of Energy Efficiency and Renewables Energy (2021). Hydrogen Production: Natural Gas Reforming - Hydrogen and Fuel Cells Technology Office. US Department of Energy.
- Revista Electricidad (13 de julio de 2020). Con hidrógeno menor al 1% del agua que usa la minería es suficiente para reemplazar el diésel.
- Strategy& (2020). The Daw of Green Hydrogen - Maintaining the GCC's Edge in a Decarbonized World.
- The World Bank (2020). Global Photovoltaic Power Potential by Country - Energy Sector Management Assistance Program.
- Thirsty Energy II (2016). The Importance of Water for Oil and Gas Extraction. The World Bank.
- Webber, M. E. (2007). The water intensity of the transitional hydrogen economy. Center for International Energy and Environmental Policy and Department of Mechanical Engineering, University of Texas.
- World Oil News (7 de marzo de 2021). Saudia Arabia takes steps to lead the \$700B global hydrogen market.