

Capítulo tercero

El hidrógeno limpio: la piedra angular de un nuevo escenario geopolítico

Thijs Van de Graaf

Resumen

El hidrógeno y los gases derivados del mismo (como el amoníaco y el metanol) gozan actualmente de un impulso político y empresarial renovado, basado en el descenso del coste de la electricidad renovable y el aumento del interés por la descarbonización profunda, a medida que cada vez más países secundan los objetivos de cero emisiones netas hacia la mitad del siglo. Este capítulo presenta una visión general de las dimensiones geopolíticas del hidrógeno como un portador de energía limpia. Con este objetivo, primero revisa las características técnicas, los distintos métodos de producción y las aplicaciones del hidrógeno. A continuación, el capítulo examina cómo el hidrógeno y los combustibles derivados podrían convertirse en materias primas de energía comercializadas a nivel mundial, y qué países están en mejor posición para convertirse en las futuras superpotencias del hidrógeno. Por último, este capítulo identifica seis ámbitos donde el hidrógeno podría dictar la geopolítica en los próximos años: el dominio tecnológico, la competencia geo-económica, el futuro de los petroestados, las nuevas interdependencias, el bloqueo del carbono (*carbon lock-in*) y la gobernanza mundial. El capítulo encuentra que el hidrógeno tiene la posibilidad de convertirse en

una materia prima mundial, si bien el tamaño y alcance de este mercado es todavía muy cuestionado e incierto. A diferencia de la creencia popular, aunque los intereses geopolíticos de este negocio emergente son muy elevados, el hidrógeno no se convertirá en una versión del petróleo sin emisiones. En todo caso, se parecerá más al mercado del gas natural licuado (GNL).

Palabras clave

Geopolítica; Hidrógeno; Combustibles Sintéticos; Transición Energética; Comercio

Abstract

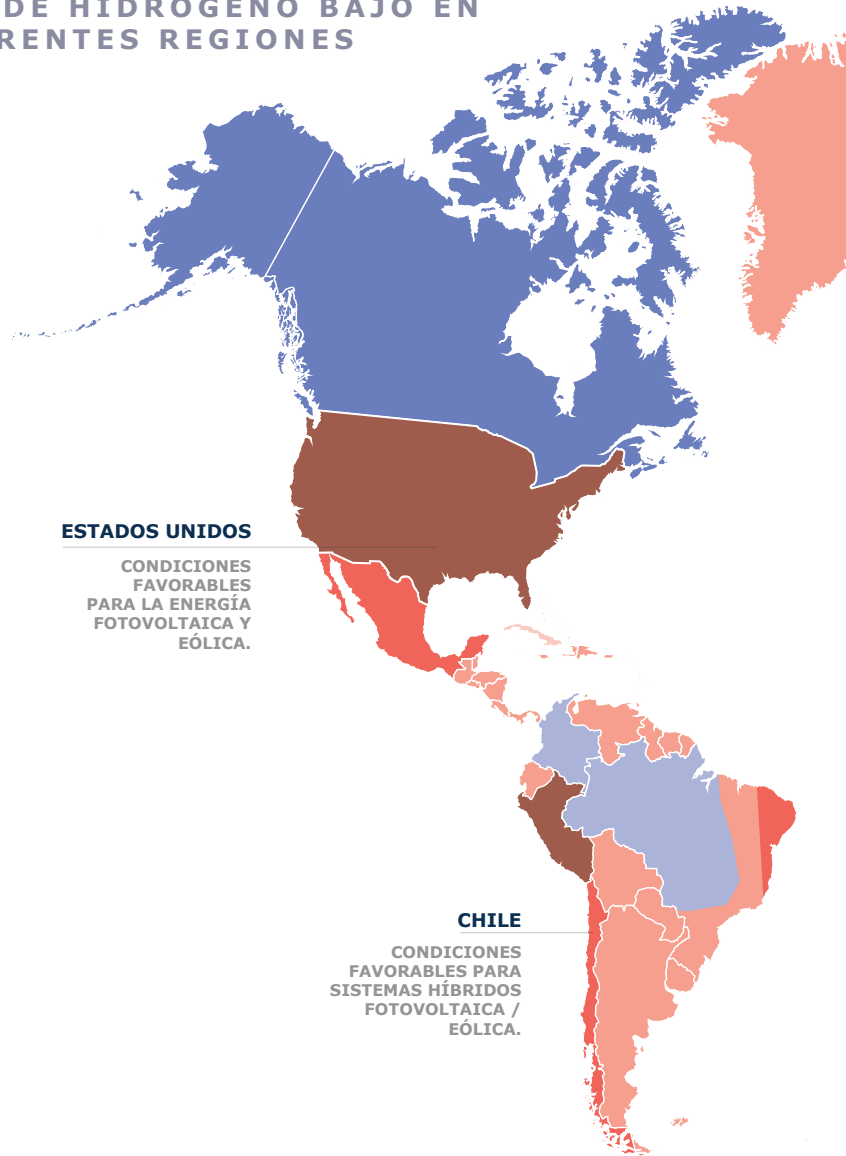
Hydrogen and derived gases (such as ammonia and methanol) are currently enjoying renewed political and business momentum, based on the declining cost of renewable electricity and surging interest in deep decarbonization, as more and more countries rally behind net zero emission targets by mid-century. This chapter presents an overview of the geopolitical dimensions of hydrogen as a clean energy carrier. To that end, it first reviews the technical characteristics, different production methods and areas of application of hydrogen. Next, the chapter examines whether and how hydrogen and derived fuels could become globally-traded energy commodities, and which countries are poised to become the hydrogen superpowers of the future. Finally, this chapter identifies six areas where hydrogen might shape geopolitics in the coming years: technology dominance, geo-economic competition, the future of petrostates, new interdependencies, carbon lock-in, and global governance. The chapter finds that hydrogen has the potential to become a global commodity, although the size and scope of that market is still very contested and uncertain. While the geopolitical stakes in this emerging business are high, hydrogen will not become a zero-carbon version of oil, contrary to popular belief. If anything, it will bear more resemblance to the liquefied natural gas (LNG) market.

Keywords

Geopolitics; Hydrogen; Synthetic Fuels; Energy Transition; Trade

POTENCIAL PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN TODAS LAS REGIONES

LA MEJOR FUENTE DE HIDRÓGENO BAJO EN CARBONO EN DIFERENTES REGIONES



Fuentes:

Mapa: Hydrogen Council - Path to Hydrogen Competitiveness, 2020 - Pág. 22.
Tabla "Selección de tipos de hidrógeno": IRENA - Green hydrogen policy, 2020 - Pág. 8.

LOS CENTROS DE DEMANDA, P. EJ. LA UNIÓN EUROPEA, EL NORESTE DE ASIA, A MENUDO TIENEN LIMITACIONES DE RECURSOS Y ES POSIBLE QUE NO PUEDAN AUTOABASTECERSE DE HIDRÓGENO.

LOS PAÍSES CON PERFILES DE CARGA COMPLEMENTARIOS DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA PUEDEN PRODUCIR HIDRÓGENO RENOVABLE A PRECIOS MUY BAJOS.

REGIONES COMO CHINA Y EE. UU. SON CENTROS DE DEMANDA Y TIENEN FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES FAVORABLES.

EUROPA

ES PROBABLE QUE SEA UN LUGAR DE GRAN DEMANDA.

ENERGÍAS RENOVABLES LIMITADAS DEBIDO A CURVAS DE CARGA VARIABLES Y DISPONIBILIDAD DE ESPACIO LIMITADO.

JAPÓN / COREA

ESTRATEGIA PARA ESCALAR EL CONSUMO DE HIDRÓGENO.

LIMITACIONES DE ESPACIO Y RECURSOS; PUEDE IMPORTAR HIDRÓGENO.

CHINA

GRANDES INVERSIONES EN ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO.

POTENCIAL PARA SER AUTOSUFICIENTE.

ORIENTE MEDIO

ALTO POTENCIAL HÍBRIDO FOTOVOLTAICO / EÓLICO DEBIDO A BUENOS RECURSOS LOCALES.

AUSTRALIA

POTENCIAL PARA PARQUES FOTOVOLTAICOS A GRAN ESCALA CON PERFILES DE CARGA FAVORABLES.

SELECCIÓN DE TIPOS DE HIDRÓGENO

COLOR	HIDRÓGENO GRIS	HIDRÓGENO AZUL	HIDRÓGENO TURQUESA	HIDRÓGENO VERDE
PROCESO	SMR O GASIFICACIÓN	SMR O GASIFICACIÓN CON CAPTURA DE CARBONO (85-95%)	PIRÓLISIS	ELECTRÓLISIS
FUENTE	GAS NATURAL O CARBÓN	GAS NATURAL O CARBÓN	GAS NATURAL	ELECTRICIDAD RENOVABLE

Nota:

SMR = Steam Methane Reforming

El hidrógeno turquesa es una opción emergente de descarbonización

Introducción

Durante décadas, los expertos en relaciones internacionales (RR. II.) utilizaron la palabra «hidrógeno» exclusivamente en relación con la bomba de hidrógeno, un arma de destrucción masiva que es muchas veces más potente que las armas atómicas convencionales que destruyeron Hiroshima y Nagasaki. En la actualidad, una aplicación más pacífica del hidrógeno ha pasado a formar parte del léxico de los especialistas de las RR. II.: el del hidrógeno como portador de energía y materia prima. Desde 2017, el gas hidrógeno y sus numerosas formas derivadas (por ejemplo, metanol o amoníaco a partir de hidrógeno) vuelven a estar en boga como soluciones esenciales para el avance de nuestras economías hacia las cero emisiones netas hacia mediados de siglo.

No es la primera oleada de interés en el hidrógeno como portador de energía. Los gases de hidrógeno prendieron una primera chispa de entusiasmo a raíz de las carencias de petróleo experimentadas por occidente en la década de 1970. El hidrógeno producido a partir del carbón y la energía nuclear se promocionó como un medio para reemplazar a las vulnerables importaciones petroleras, especialmente como combustible para el transporte. El entusiasmo por el hidrógeno se desvaneció a medida que se redujeron los precios del petróleo, pero surgió una nueva oleada de interés en la década de 1990, esta vez espoleada por las preocupaciones sobre el cambio climático. No obstante, los precios del petróleo obstinadamente bajos sofocaron muchos proyectos basados en el hidrógeno. A principios de la década de 2000, el interés por el hidrógeno regresó de nuevo, ante los temores difundidos en relación con el pico del petróleo. Después de 2010, a medida que se aplacaban los miedos derivados de la escasez del petróleo, el hidrógeno volvía a quedar en un segundo plano¹.

Actualmente, dos avances han modificado significativamente las perspectivas del hidrógeno. En primer lugar, la considerable reducción del coste de las tecnologías de energías renovables como la solar y la eólica han aumentado la probabilidad de que el «hidrógeno verde» (producido a partir de la electrolisis del agua

¹ International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen». París: OECD/IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Consultado el: 11 de enero de 2021.

mediante energías renovables) llegue a ser algún día competitivo frente a los combustibles fósiles: tan pronto como llegue 2030, según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)². En la mayoría de lugares del mundo, las energías renovables son ya la fuente de electricidad más barata³. En la actualidad la IEA se refiere a la energía solar fotovoltaica (FV) como «la fuente de electricidad más barata de la historia»⁴. Al igual que la energía solar y la eólica, los electrolizadores están inmersos en curvas de aprendizaje tecnológico y pueden alcanzar reducciones de costes similares a las ya observadas en las tecnologías renovables. El hidrógeno verde es técnicamente una subcategoría de la electricidad renovable, a partir de la cual se produce. Así, el hidrógeno podría permitir la penetración de fuentes renovables y baratas de electricidad en otros sectores de uso final, como la industria, el transporte y los edificios, donde podría reemplazar a los combustibles fósiles.

En segundo lugar, los gobiernos adoptaron el Acuerdo de París a finales de 2015, que establece el objetivo de limitar el calentamiento global a menos de 2 °C y realizar esfuerzos para mantenerlo por debajo de 1,5 °C. Aunque las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) están lejos de alcanzar dicho objetivo, los gobiernos parecen tomarse cada vez más en serio la mitigación del cambio climático. Si la próxima administración de Biden cumple su promesa, pronto, más de dos terceras partes de las emisiones de CO₂ mundiales estarán bajo un compromiso de cero emisiones netas hacia mediados de siglo⁵. Para alcanzar este objetivo, el hidrógeno sin emisiones podría ser una solución técnica importante o incluso indispensable para descarbonizar aquellos sectores cuya electrificación resulta difícil, como el sector naval o aeronáutico, el transporte de larga

² International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Renewables to Meet the 1.5°C Climate Goal». Abu Dhabi: IRENA, 17 de diciembre de 2020. Disponible en: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Consultado el 13 de enero de 2021.

³ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable power generation costs in 2019», IRENA, junio de 2020. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. Consultado el: 11 de enero de 2021.

⁴ International Energy Agency (IEA), «World Energy Outlook 2020». París: OECD/IEA, p. 214.

⁵ United Nations Environment Program (UNEP), «Emissions Gap Report 2020», p. xvii. Disponible en: <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/EGR20.pdf>. Consultado el: 13 de enero de 2021.

distancia y los procesos industriales que utilizan temperaturas muy elevadas⁶.

Gracias a estos avances, esta vez podría ser diferente y el sector del hidrógeno podría despegar finalmente después de varios intentos frustrados. El hidrógeno incluso podría allanar el camino para un aumento de los flujos comerciales internacionales. Los grandes países industrializados, como Japón, Corea, Alemania y el resto de la Unión Europea (UE) están apostando por la importación a gran escala de hidrógeno para cumplir sus compromisos de cero emisiones netas. Así, el hidrógeno podría convertirse en un nuevo mercado de materias primas grande –y posiblemente lucrativo– que atraería la atención de los gobiernos y las juntas directivas de las grandes corporaciones. Si el hidrógeno está destinado a convertirse en una importante fuente de energía en el futuro, una versión descarbonizada del petróleo, el sector presenta sin duda un enorme interés geopolítico y altos riesgos.

El hidrógeno es tan atractivo para los responsables políticos debido a que puede ofrecer un suministro de energía, y calor, seguro y fiable en todo momento, de día o de noche, en verano o en invierno, a un coste que sin duda se reducirá y sin emitir dióxido de carbono (si se produce a partir de energías renovables o energía nuclear)⁷. Es un factor vital para el acoplamiento entre sectores, además de un portador de energía almacenable y transportable (a diferencia de las fuentes de electricidad intermitentes, como la solar o la eólica). Como puede almacenarse en cantidades ilimitadas, el hidrógeno es *la única* solución capaz de ofrecer una elevada resiliencia a la economía del futuro, con cero emisiones netas y alta electrificación⁸. A diferencia del gas y el petróleo, puede producirse en cualquier lugar del mundo, lo que reduce los riesgos de relaciones comerciales asimétricas que alguna de las partes podría explotar a nivel político.

En este capítulo se proponen exponer las dimensiones geopolíticas del hidrógeno. A tal efecto, se compone de cinco partes. La

⁶ BELMANS, Ronnie and VINGERHOETS, Pieter: «Molecules: Indispensable in the Decarbonized Energy Chain», EUI RSCAS PP, 2020/01, Florence School of Regulation. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1814/66205>. Consulta el 18 de enero de 2021.

⁷ LEPERCQ, Thierry, «Hydrogen is the New Oil: How 7 Energy Battles are Giving Birth to a Carbon-Free World». París: Cherche Midi, 2019.

⁸ LIEBREICH, Michael, «Separating Hype from Hydrogen – Part Two: The Demand Side», 16 de octubre de 2020. Disponible en: <https://about.bnef.com/blog/liebreich-separating-hype-from-hydrogen-part-two-the-demand-side/>. Consulta el 22 de diciembre de 2020.

siguiente sección revisa el potencial técnico y el coste económico de diferentes cadenas de valor del hidrógeno, y aborda tanto los métodos de producción como sus posibles casos de uso. La sección siguiente trata de identificar los principales agentes en el escenario global del hidrógeno, para lo cual combina una visión general con casos prácticos de Japón, la Unión Europea, Australia y Chile. A continuación, pasaremos a debatir los factores geopolíticos y las implicaciones de las evoluciones actuales del hidrógeno. Se identifican y abordan con detalle seis dimensiones geopolíticas del hidrógeno:

- La carrera para alcanzar el liderazgo tecnológico.
- Las fricciones comerciales y las estrategias industriales competitivas.
- El impacto del hidrógeno sobre el futuro de los petroestados.
- Nuevas interdependencias surgidas del comercio internacional del hidrógeno.
- Riesgos de bloqueo del carbono (*carbon lock-in*) y activos varados.
- Regulación competitiva y gobernanza de los mercados del hidrógeno.

¿Qué es el hidrógeno?

Características técnicas

Para entender por completo la revolución que el hidrógeno puede desatar, es importante conocer algunos principios científicos básicos relacionados con el hidrógeno. El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante en el universo. Es un gas diatómico denominado con la fórmula molecular H_2 . No es tóxico, no es metálico, es inodoro e insípido, no contiene carbono y es altamente inflamable. El hidrógeno no suele darse como una molécula libre en la naturaleza, sino que tiende a asociarse con otros elementos, en particular el oxígeno (para formar agua, H_2O) y el carbono (para formar diversos tipos de hidrocarburos, incluidos los combustibles fósiles, como el metano o CH_4).

Actualmente, el hidrógeno se utiliza casi exclusivamente como materia prima para otros productos químicos, como el amoníaco (NH_3), un producto esencial para producir fertilizantes nitrogenados, metanol (CH_3OH) y etanol (C_2H_5OH). En las refinerías de petróleo se añade también al petróleo pesado a fin de producir combustibles para el transporte. Hoy en día, la producción de amoníaco y el refinado de petróleo suponen dos terceras partes

del uso mundial del hidrógeno⁹. La demanda industrial del hidrógeno ya es un mercado global muy importante, con una demanda total de unos 115 millones de toneladas métricas en 2018¹⁰, con un valor de 135 500 millones de dólares¹¹, y experimenta un rápido crecimiento.

No obstante, el hidrógeno también tiene un gran potencial como «portador de energía química o vector energético». Contiene más energía por unidad de peso que los combustibles fósiles. Como combustible, el hidrógeno puede reconvertirse en electricidad o en calor mediante la siguiente reacción química: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{electricidad} + \text{calor}$. Esto puede realizarse mediante la combustión (como el gas natural o el carbón en las centrales eléctricas, o el combustible en los vehículos a motor) o mediante oxidación en las pilas de combustible. En ambos casos, el hidrógeno no produce dióxido de carbono (CO_2), partículas (PM), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ni aumenta el ozono al nivel del suelo (O_3). Su único producto derivado es el vapor de agua (H_2O), que es totalmente inocuo. Así, a menudo se citan las ventajas del hidrógeno para mitigar el cambio climático y la contaminación atmosférica local.

No obstante, es muy importante subrayar que el hidrógeno no es una fuente de energía. No puede extraerse del suelo ni de la atmósfera, como el crudo o la radiación solar. Por el contrario, es un portador de energía o vector energético, igual que la electricidad. Esto significa que debe producirse utilizando otras fuentes de energía. En la actualidad, más del 99 % de toda la producción específica de hidrógeno se realiza a partir de combustibles fósiles¹², lo que produce una importante huella de CO_2 . De hecho, hoy en día la producción de hidrógeno es responsable de unas emisiones anuales equivalentes a las del Reino Unido (RU) e Indonesia combinadas¹³. Con los actuales métodos de producción, el hidrógeno no desempeña ningún papel en los

⁹ International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen». París: OECD/IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Consultado el: 11 de enero de 2021.

¹⁰ IEA, «The Future of Hydrogen», p. 18.

¹¹ Baker McKenzie, «Shaping Tomorrow's Global Hydrogen Market Via De-Risked Investments». Enero de 2020. Disponible en: https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2020/01/hydrogen_report.pdf?la=en. Consulta el 11 de enero de 2021.

¹² IEA, «The Future of Hydrogen», p. 32.

¹³ IEA, «The Future of Hydrogen», p. 14.

esfuerzos de descarbonización mundiales. No obstante, existen otros métodos de producción que se revisarán en la próxima sección.

Métodos de producción

Las diversas maneras de producir hidrógeno suelen describirse mediante distintos códigos de color (véase la Tabla 1). El «gris» se utiliza en referencia a la producción de hidrógeno mediante combustibles fósiles. En ocasiones se denomina también hidrógeno «marrón» (si se basa en *brown coal* o lignito) o hidrógeno «negro» (si se basa en *black coal* o antracita). Con mucho, la mayor parte del hidrógeno (alrededor del 75 %) se produce mediante reformado de metano con vapor (SMR), que combina gas natural y agua calentada en forma de vapor. El resultado es hidrógeno y dióxido de carbono. A continuación viene la gasificación del carbón, que representa otro 23 % de la producción de hidrógeno¹⁴. Estos métodos de producción no son adecuados para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas debido a la gran cantidad de emisiones de CO₂ que generan.

Color	Proceso	Fuente	Emisiones de CO₂
Hidrógeno gris	Reformado de metano con vapor (SMR) o gasificación	Gas natural o carbón	Altas
Hidrógeno azul	SMR o gasificación con CAC	Gas natural o carbón	Bajas
Hidrógeno turquesa	Pirolisis	Gas natural	Prácticamente cero si el calor es suministrado por renovables o energía nuclear
Hidrógeno verde	Electrolisis	Electricidad renovable	Prácticamente cero
Hidrógeno rosa	Electrolisis	Electricidad nuclear	Prácticamente cero

Tabla 1. Principales tipos de hidrógeno.

¹⁴ IEA, «The Future of Hydrogen», p. 38.

En teoría, ambos procesos de producción pueden estar equipados con tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC), en cuyo caso se denomina hidrógeno «azul». Las tecnologías de CAC solo permiten capturar el 85-95 % de las emisiones de CO₂ como mucho¹⁵, por lo que la producción de hidrógeno azul emite menos carbono que la de sus homólogos gris o negro, pero todavía no es neutro en carbono. Además, la continua dependencia de la extracción de gas natural entraña un riesgo de emisiones indirectas (fugas) de metano, un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO₂. Igualmente, dicha instalación implica costes adicionales para la captura, el transporte y el almacenamiento del CO₂, y pueden enfrentarse a problemas de aceptación social¹⁶. En términos de seguridad energética, el hidrógeno azul sigue dependiendo de una base de recursos finita, está expuesto a las fluctuaciones en el precio de los combustibles fósiles y puede implicar una dependencia constante de importaciones procedentes de países proveedores inestables.

Otra vía de producción es el denominado hidrógeno «turquesa». Utiliza gas natural como materia prima, pero no produce emisiones de CO₂. Mediante el proceso de pirolisis, el metano o el gas natural (CH₄) se descomponen en hidrógeno gaseoso (H₂) y carbono sólido (C). Resulta interesante mencionar que ya existe un mercado para el carbono sólido que ofrece oportunidades de explotar una fuente de ingresos adicional. Lo mismo se aplica al CO₂ en escenarios que permiten la utilización del dióxido de carbono capturado, pero el carbono sólido se almacena con mayor facilidad que el CO₂ gaseoso. Para que esta técnica de producción sea neutra en carbono, el calor de alta temperatura debe generarse mediante energías renovables o energía nuclear, y los residuos de carbono deben retenerse de forma permanente. En este momento, el hidrógeno «turquesa» se encuentra en fase piloto.

El hidrógeno «verde» se obtiene a partir de la electrolisis del agua, utilizando electricidad generada mediante fuentes renovables. La electrolisis fue inventada por dos químicos británicos en 1800. Se trata de un proceso que utiliza la corriente eléctrica para separar el agua en hidrógeno y oxígeno. Los electrolizadores están formados por dos electrodos (ánodo y cátodo) separados

¹⁵ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Renewables to Meet the 1.5°C Climate Goal». Abu Dabi: IRENA, 17 de diciembre de 2020, p. 16.

¹⁶ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen: A Guide To Policy-Making». Abu Dabi: IRENA, noviembre de 2020, p. 9.

por un electrolito. Hay diferentes tipos de electrolizadores, sobre todo en función del tipo de material utilizado como electrolito. Las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de la producción de hidrógeno mediante electrolisis son prácticamente cero si la electricidad se produce a partir de fuentes renovables, como la energía solar y la eólica. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la electricidad de la red procede de diversas fuentes. Por eso, la Comisión Europea, en su Estrategia del Hidrógeno, establece una diferencia entre el «hidrógeno producido a partir de electricidad» y el «hidrógeno producido a partir de energías renovables»¹⁷. El hidrógeno a partir de renovables también puede producirse mediante el reformado de biogás o la conversión bioquímica de biomasa.

Otro color en la gama de las tecnologías del hidrógeno es el «rosa», que hace referencia al hidrógeno producido a partir de electricidad nuclear, también mediante electrolisis. El hidrógeno rosa no suele mencionarse en las estrategias de hidrógeno europeas, pero podría convertirse en un pilar importante de las industrias del hidrógeno en países como Rusia y China¹⁸. Después, los colores quedan algo difuminados. Algunos utilizan el hidrógeno «amarillo» para describir el hidrógeno electrolítico usando una combinación de energías fósiles y renovables. Por último, el hidrógeno «blanco» es el hidrógeno geológico presente de forma natural en depósitos subterráneos y extraído mediante fracturación, aunque actualmente no existen estrategias de explotación viables.

Aplicaciones

Una de las características más atractivas del hidrógeno es su versatilidad. Puede introducirse en la red de gas, utilizarse en vehículos con pila de combustible, convertirse en otros combustibles sintéticos o convertirse en electricidad para la red. Al permitir la conversión de electricidad en moléculas (mediante electrolisis) y de nuevo en electricidad (mediante pilas de combustible), es un factor vital para el «acoplamiento entre sectores», una de las palabras de moda en los círculos energéticos, que hace referencia

¹⁷ European Commission, «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe». Bruselas, 8 de julio de 2020, págs. 3-4.

¹⁸ NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; and HAFNER, Manfred. «The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective». *Sustainability* 13, n.º 1 (2021): 298.

a la integración de diferentes sectores consumidores de energía (p. ej., edificios, transporte e industria) con el sector eléctrico. El hidrógeno permite convertir la electricidad renovable en moléculas de gas (un proceso denominado «de electricidad a gas») que, a su vez, permite descarbonizar partes de la industria y el transporte que no pueden electrificarse.

Además, existen importantes sinergias entre el hidrógeno y un sistema eléctrico basado en energías renovables. El hidrógeno amplía el alcance de las soluciones renovables, por ejemplo, en la industria. También es prácticamente la única forma de proporcionar un almacenamiento estacional y neutro en carbono para la electricidad renovable¹⁹ y, de este modo, tiene una ventaja sobre las baterías, que solo pueden ofrecer almacenamiento durante algunas horas como máximo. Algunas personas han sugerido que el hidrógeno también podría ofrecer una forma de solucionar los problemas de restricción de la generación renovable variable y los precios negativos de la electricidad, pero las investigaciones han mostrado que no siempre tiene sentido construir electrolizadores para almacenar los vertidos de energía²⁰. Por otro lado, los electrolizadores podrían añadir un elemento de flexibilidad en el lado de la demanda («aplanado de picos» o «*peak shaving*») para equilibrar la red en todo momento²¹. Por último, el hidrógeno permite enviar la energía renovable a través de distancias mucho mayores que las redes de corriente continua de alta tensión. Este aspecto se denomina *shipping the sunshine* en la estrategia nacional de hidrógeno de Alemania²².

Algunos partidarios tienen una visión expansiva de la función del hidrógeno en la sociedad y defienden su uso en todos los sectores

¹⁹ DNV GL, «The Promise of Seasonal Storage». Position Paper, febrero de 2020. Disponible en: <https://www.dnvgl.com/publications/the-promise-of-seasonal-storage-168761>. Consulta el 18 de enero de 2021.

²⁰ UK National Infrastructure Commission (NIC), «Net Zero: Opportunities for the Power Sector». 6 de marzo de 2020. Disponible en: <https://nic.org.uk/app/uploads/Net-Zero-6-March-2020.pdf>. Consulta el 22 de diciembre de 2020.

²¹ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Hydrogen: A Renewable Energy Perspective», Informe preparado para la segunda Hydrogen Energy Ministerial Meeting en Tokio, Japón, septiembre de 2019. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

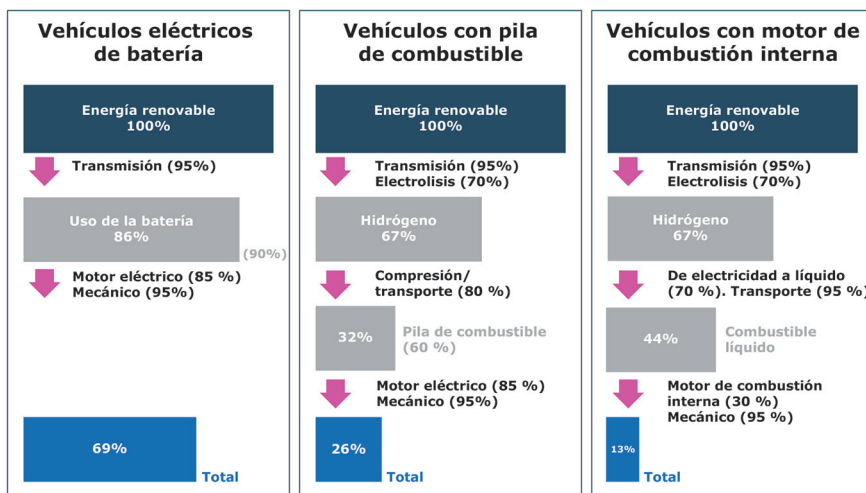
²² The German Federal Government, «The National Hydrogen Strategy». Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, junio de 2020. Disponible en: https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

de la economía. La estrategia nacional del hidrógeno japonesa tiene el objetivo explícito de convertir el país en la primera sociedad del mundo basada en el hidrógeno²³. Sin embargo, una de las desventajas del hidrógeno es que cada conversión implica una pérdida de energía. Las leyes de la termodinámica establecen que el contenido de energía que se obtiene del proceso de producción del hidrógeno es siempre inferior a la electricidad o el gas natural empleados. Aproximadamente, esto se traduce en la siguiente aritmética sencilla: la conversión de electricidad, verde o no, en hidrógeno implica una pérdida aproximada del 30 % del contenido energético de la electricidad. Cualquiera que sea el paso posterior que se tome para dar un uso práctico al hidrógeno (p. ej., pilas de combustible o combustión del hidrógeno), implicará otra pérdida del 30 % (del 70 % de la energía restante del hidrógeno), lo que solo permite aprovechar aproximadamente la mitad de la energía contenida en la electricidad original para fines útiles²⁴.

Si se comparan las diferentes tecnologías de los vehículos de pasajeros, como muestra la Figura 1, los vehículos eléctricos a batería (BEV) tienen el mayor índice de eficiencia (69 %). Los vehículos eléctricos con pila de combustible de hidrógeno (FCEV), por el contrario, tienen pérdidas de conversión que alcanzan el 74 % y aumentan hasta un sorprendente 87 % en el caso de vehículos que queman combustibles sintéticos derivados del hidrógeno. Esto significa que se necesita aproximadamente 2,5 veces más electricidad para recorrer los mismos 100 km con un FCEV que con un BEV, y unas cinco veces más electricidad para recorrer la misma distancia en un vehículo alimentado con combustibles sintéticos. El motivo es muy sencillo. Los automóviles con pila de combustible son esencialmente vehículos eléctricos, pero existen dos pasos de conversión adicionales en comparación con los vehículos eléctricos a batería: la energía debe transformarse de electricidad a gas, y de nuevo a electricidad, para mover el vehículo. Se produce una situación similar al comparar bombas de calor eléctricas con calderas de hidrógeno o sistemas de calefacción con pila de combustible (Figura 2).

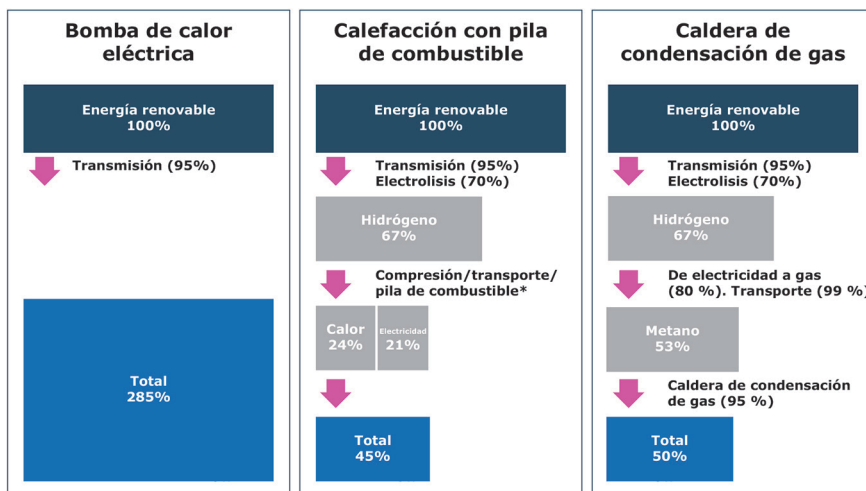
²³ Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry, «Basic Hydrogen Strategy». 26 de diciembre de 2017. Disponible en: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

²⁴ HENNINGSEN, Jorgen: «Why hydrogen is no magic solution for EU green deal». *EU Observer*, 4 de agosto de 2020. Disponible en: <https://euobserver.com/opinion/149089>. Consulta el 11 de enero de 2021.



Las eficiencias individuales están indicadas entre paréntesis. Teniendo en cuenta todas ellas, se obtienen las eficiencias acumuladas generales indicadas en los recuadros.

Figura 1. Eficiencia de conversión para automóviles con diferentes tecnologías motrices²⁵.



Eficiencias: 80% (compresión/transporte) y 85% (total pila de combustible; 45% calor, 40% electricidad). Nota: Las eficiencias individuales están indicadas entre paréntesis. Teniendo en cuenta todas ellas se obtienen las eficiencias acumuladas generales indicadas en los recuadros. Para las bombas de calor, se ha asumido un factor de rendimiento anual de 3.

Figura 2. Eficiencia de conversión para diferentes sistemas de calefacción²⁶.

²⁵ Agora Energiewende y Frontier Economics, «The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels», 19 de septiembre de 2018, p. 12. Disponible en: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

²⁶ Agora Energiewende y Frontier Economics, «The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels». 19 de septiembre de 2018, p. 13. Disponible en: <https://static.agor>

Para algunos, el hidrógeno es la solución a todos los problemas energéticos. Sin embargo, la realidad es que, como señaló recientemente Michael Liebreich, CEO de Bloomberg New Energy Finance: «El hidrógeno tendrá que ganarse cada caso de uso, pero no será fácil». Concluye que «el papel del hidrógeno en el *mix* energético final de un mundo futuro con cero emisiones netas será asumir funciones que no puedan hacerse de forma más sencilla, barata y eficiente mediante el uso directo de electricidad limpia y de baterías»²⁷. Estos sectores probablemente incluirán la industria pesada, en particular los productos químicos, fertilizantes, refinerías y siderurgia, además del transporte marítimo, la aviación de larga distancia, el transporte de mercancías, redes e infraestructura eléctrica. Algunos de estos sectores, como el naval, son «mercados cautivos», lo que significa que no tienen más opción que utilizar combustibles basados en el hidrógeno. Es un sector que podría impulsar la demanda, y ayudar a reducir los costes del hidrógeno y los combustibles relacionados.

No obstante, muchas compañías siguen estudiando soluciones basadas en el hidrógeno para sectores que pueden electrificarse. Los fabricantes de automóviles japonés y coreano Toyota y Hyundai, junto con sus respectivos gobiernos, han anunciado planes ambiciosos para aumentar la producción y la venta de vehículos de hidrógeno. Existen planes en curso para desarrollar trenes movidos por hidrógeno en el Reino Unido, Austria, Francia y Japón. Hay al menos 37 proyectos en todo el mundo para integrar el hidrógeno en la actual red de distribución de gas. En algunos casos, estos planes seguirán progresando porque las empresas ya han comprometido grandes sumas de dinero a investigación y desarrollo para diversos casos de uso, y resultaría costoso abandonar estos programas. En otros casos, determinados agentes industriales (p. ej., el grupo de presión del gas) pueden influir en las autoridades políticas mediante lobby y obtener así apoyo público (p. ej., con órdenes de integración del hidrógeno) dinero a investigación y desarrollo para diversos casos de uso, y resultaría

ra-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

²⁷ LIEBREICH, Michael: «Separating Hype from Hydrogen – Part Two: The Demand Side». 16 de octubre de 2020. Disponible en: <https://about.bnef.com/blog/liebreich-separating-hype-from-hydrogen-part-two-the-demand-side/>. Consulta el 22 de diciembre de 2020.

costoso abandonar estos programas. En otros casos, determinados agentes industriales (p. ej., el grupo de Presión el gas) pueden influir en las autoridades políticas mediante lobby y obtener así apoyo público (p. ej., con órdenes de integración del hidrógeno)²⁸.

En resumen, las estimaciones del potencial comercial del hidrógeno varían considerablemente. Como muestra la Tabla 2 (debajo)²⁹, BNEF es la mayor partidaria del hidrógeno y estima que podría satisfacer hasta el 24 % de la demanda energética final en 2050. Otros, como Shell, consideran que el hidrógeno solo satisfará el 2 % de la demanda energética. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) estima que la demanda de hidrógeno bajo en carbono será de 11 EJ (o 75 millones de toneladas) en 2040, al menos en su Escenario de Desarrollo Sostenible³⁰. En este momento, solo el 0,002 % de todo el hidrógeno producido actualmente se utiliza como portador de energía³¹, de modo que algunas de estas cifras de demanda previstas implican un ritmo de crecimiento anual compuesto muy rápido.

²⁸ Corporate Europe Observatory, «The hydrogen hype: Gas industry fairy tale or climate horror story?». 7 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://corporateeurope.org/en/hydrogen-hype>. Consulta el 22 de diciembre de 2020.

²⁹ Esta table se ha adaptado, ampliado y actualizado gracias a: FRIDOLIN, Pflugmann; and DE BLASIO, Nicola: «The Geopolitics of Renewable Hydrogen in Low-Carbon Energy Markets». *Geopolitics, History, and International Relations* 12, no. 1 (2020): 9-44.

³⁰ IEA, «World Energy Outlook 2020», p. 294.

³¹ DNV GL, «Hydrogen as an energy carrier: An evaluation of emerging hydrogen value chains», 2018, pg. 4. Disponible en: <https://www.dnvgl.com/publications/hydrogen-as-an-energy-carrier-134607>. Consulta el 12 de enero de 2021.

	Estudio	Demanda anual (en EJ)	% de la energía final
Demanda prevista para el hidrógeno en 2050	Hydrogen Council (2017) ³²	78 EJ	18 %
	BNEF (2020) ³³	27-195 EJ	7-24 %
	DNV GL (2020) ³⁴	24 EJ	6 %
	Shell Sky Scenario (2018) ³⁵	9 EJ	2 %
	Transforming Energy Scenario de IRENA (2020) ³⁶	8 EJ	1 %
A modo de comparación, la demanda anual actual para:			
Hidrógeno	IEA (2019)	9-11 EJ	~0 %
Petróleo	BP (2020)	193 EJ	33 %
Gas natural	BP (2020)	141 EJ	24 %

Tabla 2. Potencial comercial estimado para el hidrógeno en 2050 Notas para la Tabla 2: un exajulio (EJ) es 1 trillón de julios (J). Es equivalente a aproximadamente un día de la demanda de energía final total mundial, o unos 170 millones de barriles de petróleo³⁷. La demanda de hidrógeno anual estimada incluye la demanda de hidrógeno (de todos los colores) como portador de energía y como materia prima. La proporción estimada del hidrógeno en la demanda de energía final solo cubre el suministro de hidrógeno como portador de energía.

³² Hydrogen Council, «Hydrogen – Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition». 2017, p. 20. Disponible en: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>. Consulta el 12 de enero de 2021.

³³ <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>

³⁴ DNV GL, «Energy Transition Outlook 2020». Septiembre de 2020, p. 100 y p. 103. Disponible en: <https://download.dnvgl.com/eto-2020-download>. Consulta el 12 de enero de 2021.

³⁵ Shell, «Shell Scenarios – Sky: Meeting the Goals of the Paris Agreement». Cifras disponibles en: https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/numbers-behind-sky/_jcr_content.stream/1530643757647/c6daf2e0c93fd3d724f-2804837d053fdd24e0553/shell-sky-scenario-data-2018.xlsx. Consulta el 12 de enero de 2021.

³⁶ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050». Abril de 2020, Abu Dabi, IRENA. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Consulta el 13 de enero de 2021.

³⁷ Hydrogen Council, «Hydrogen – Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition». 2017, p. 20. Disponible en: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>. Consulta el 12 de enero de 2021.

Hacia un mercado internacional del hidrógeno

El hidrógeno podría convertirse en una materia prima comercializada a nivel mundial, igual que el crudo, los productos derivados del petróleo y el gas natural. En la actualidad, los dos principales competidores para proporcionar moléculas de energía limpia en el futuro son los hidrógenos azul y verde. En el caso del hidrógeno azul, el comercio internacional seguiría siendo necesario para transportarlo desde los productores a los mercados de destino. En el caso del hidrógeno verde, el mayor componente del coste es el de la electricidad renovable, por lo que la electricidad barata es un requisito previo esencial para ser un productor de hidrógeno verde competitivo: los electrolizadores asequibles no son suficientes³⁸. Esto crea una oportunidad de producir hidrógeno verde en aquellos lugares del mundo que cuentan con fuentes renovables óptimas y exportarlo desde allí a los centros de gran demanda.

Opciones de transporte

La baja densidad energética por volumen del hidrógeno hace que su almacenamiento y transporte resulten mucho más costosos. Sin embargo, existen diferentes opciones para el transporte. Según la AIE, el transporte del hidrógeno mediante redes es la forma más rentable si las distancias son inferiores a 1500 km, excepto para volúmenes muy pequeños, que podrían transportarse en camión. Para distancias superiores, y en particular para el comercio internacional, el hidrógeno puede transportarse a través de las fronteras mediante barcos o redes, bien en forma pura, unido por medios químicos o convertido en diferentes combustibles.

Redes de transporte

Para los países en estrecha proximidad geográfica, el hidrógeno puede transportarse mediante redes, que es el método más económico para suministrar hidrógeno a largo plazo. En el noroeste de Europa, ya existen más de 4500 km de redes de hidrógeno, que

³⁸ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Renewables to Meet the 1.5°C Climate Goal», Abu Dabi: IRENA, 17 de diciembre de 2020. Disponible en: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Consulta el 13 de enero de 2021.

incluyen una red de conductos de 900 km que conecta los puertos de Róterdam (Países Bajos), Amberes (Bélgica) y Dunquerque (Francia). En Estados Unidos existen actualmente 1200 km de redes de hidrógeno³⁹. Los operadores alemanes de redes de gas han presentado recientemente un proyecto para una red de hidrógeno de 5900 km, denominada H2 Startnetz, basada en redes de gas natural convertidas. En 2030, debería haber unos 1200 km operativos⁴⁰. La nueva red también se ramificará a los Países Bajos, donde podría conectarse con la red de H₂ existente. Aunque estos planes parecen ambiciosos, su tamaño palidece en comparación con la infraestructura de gas natural existente. Solo en Alemania, la red de gas natural tiene una longitud de más de 530 000 km⁴¹.

Un atajo es transformar la red actual de transmisión y distribución de gas natural para que pueda transportar hidrógeno. Un paso de bajo coste a corto plazo sería actualizar las redes existentes para que puedan transportar una mezcla de gas natural e hidrógeno (con hasta el 15 % de hidrógeno) con solo unas ligeras modificaciones. No obstante, transformar las redes de gas natural para suministrar hidrógeno puro resulta más complicado, ya que el hidrógeno puede fragilizar el acero y las soldaduras de la tubería, entraña riesgos de fugas y peligros de seguridad, y requiere costosas tecnologías de compresión⁴². La idoneidad de las redes existentes para su conversión en redes para hidrógeno debe evaluarse de manera individual, y dependerá del tipo de acero empleado y de la pureza del hidrógeno⁴³. No obstante, el sector del transporte de gas está convencido

³⁹ Shell and Wuppertal Institute, «Shell Hydrogen Study: Energy of the Future?» 2017. Disponible en: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁴⁰ RADOWITZ, Bernd: «German pipeline operators present plan for world's largest hydrogen grid». Recharge, 18 de mayo de 2020. Disponible en: <https://www.recharge-news.com/transition/german-pipeline-operators-present-plan-for-world-s-largest-hydrogen-grid/2-1-810731>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁴¹ Gasunie, «Infrastructure in Germany: status quo». Sin fecha. Disponible en: <https://www.gasunie.de/en/infrastructure/infrastructure-in-germany/statusquo>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁴² US Department of Energy, «Hydrogen Pipelines». Sin fecha. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁴³ International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen». París: OECD/IEA, p. 77. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Consulta el 11 de enero de 2021.

de que dicha actualización es técnicamente viable a un coste asequible⁴⁴.

Si esto es así, Europa se beneficiaría de sus conexiones de transporte de gas establecidas con Noruega, Ucrania, Rusia y África del Norte (Argelia y Libia). El resultado sería que, al igual que el gas natural, el hidrógeno podría comerciarse más en los mercados regionales que en los mercados globales. En resumen, el transporte del hidrógeno resulta bastante más costoso que el transporte del gas natural que, a su vez, es más caro que el transporte de petróleo. También está por ver si las redes de hidrógeno pueden competir con las redes eléctricas de corriente continua de tensión (ultra) alta, que también pueden transportar electricidad renovable hasta los centros de demanda. Uno de los proyectos que actualmente se encuentra en la fase de planificación es Sun Cable, que se propone conectar una planta solar de 10 GW en el sur de Australia con Singapur a través de un cable submarino de 3750 km⁴⁵.

Transporte marítimo

El hidrógeno puede transportarse entre los continentes en barco básicamente de tres maneras. La primera forma de transportar hidrógeno es licuarlo. Para ello, las moléculas de hidrógeno deben enfriarse hasta menos 252 °C en las terminales portuarias antes de cargarlo en buques cargueros altamente aislados. El proceso de licuefacción consume aproximadamente del 25 % al 35 % de la cantidad inicial de hidrógeno. Es bastante más energía de la que se requiere para licuar el gas natural en GNL, que debe ser enfriado hasta menos 160 °C y consume aproximadamente el 10 % del contenido de energía de la cantidad inicial de gas natural⁴⁶. Actualmente solo existe un buque carguero en el mundo capaz de transportar hidrógeno puro, el Hydrogen Frontier, botado por Kawasaki a finales de 2019⁴⁷.

⁴⁴ Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Teréga (2020). European Hydrogen Backbone, julio de 2020.

⁴⁵ Para más información, véase: <https://suncable.sg/>.

⁴⁶ International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen». París: OECD/IEA, p. 74. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Consulta el 11 de enero de 2021.

⁴⁷ HARDING, Robin: «Japan launches first liquid hydrogen carrier ship». *Financial Times*, 11 de diciembre de 2019.

La segunda forma es mediante portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC). LOHC hace referencia a una serie de compuestos orgánicos diferentes (p. ej., metanol (CH_3OH) o tolueno (C_7H_8)) capaces de absorber y liberar hidrógeno mediante una reacción química. Por lo tanto, los LOHC pueden servir como un medio de almacenamiento y transporte para el hidrógeno. En un primer paso, el hidrógeno se carga en la molécula de LOHC (un proceso llamado «hidrogenación»). La principal ventaja de utilizar moléculas «portadoras» es que pueden transportarse como líquidos sin necesidad de refrigeración. Por eso, en ocasiones se denominan «baterías de hidrógeno líquido»⁴⁸. Los LOHC son muy parecidos al crudo y sus productos derivados, e incluso podría adaptarse la infraestructura actual de transporte de petróleo para el transporte de LOHC⁴⁹. Después del transporte y almacenamiento, el hidrógeno vuelve a liberarse del LOHC («deshidrogenación»). La desventaja es que las conversiones consumen alrededor del 35-40 % del contenido energético del hidrógeno⁵⁰. Además, las moléculas portadoras pueden ser caras y es necesario volver a transportarlas hasta su lugar de origen. En abril de 2020, un primer buque de demostración transportó hidrógeno a una distancia de 4000 km, de Brunéi a Japón, usando tolueno como molécula portadora.

La tercera forma de transportar hidrógeno en barco es convertirlo en «combustibles sintéticos», también denominados «electrocombustibles» o «e-combustibles» si se producen con hidrógeno obtenido a partir de la electrolisis del agua. La ventaja de estos e-combustibles es que el consumidor final puede utilizarlos directamente. Algunos de los principales tipos de combustibles sintéticos derivados del hidrógeno son el amoníaco, el metanol, el metano sintético y los líquidos sintéticos. Los dos últimos son químicamente idénticos al gas natural y los productos derivados del petróleo, respectivamente, y pueden transportarse mediante la infraestructura actual de almacenamiento y distribución. Su producción exige una fuente de CO_2 . Si esta fuente procede de la captura directa de aire (DAC) o de bioenergía con CAC, estos combustibles sintéticos pue-

⁴⁸ AAKKO-SAKSA, Päivi T.; COOK, Chris; KIVIAHO, Jari; and REPO, Timo: «Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy-Review and discussion». *Journal of Power Sources* 396 (2018): 803-823.

⁴⁹ NIERMANN, M.; DRÜNERT, Sebastian; KALTSCHMITT, Martin and BONHOFF, Klaus: «Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs)-techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain». *Energy & Environmental Science* 12, n.º 1 (2019): 290-307.

⁵⁰ International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen». París: OECD/IEA, p. 75. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Consulta el 11 de enero de 2021.

den ser neutros en carbono. Los dos primeros tipos, el amoníaco y el metanol, merecen un tratamiento más detallado.

El amoníaco, en ocasiones denominado «el otro hidrógeno» es, al igual que el hidrógeno, un combustible libre de carbono (NH_3). El hidrógeno puede convertirse en amoníaco reaccionando con el nitrógeno del aire mediante el proceso de Haber-Bosch. En otras palabras, este combustible libre de carbono puede producirse solo con electricidad, agua y aire. El amoníaco tiene una densidad energética muy superior en comparación con el hidrógeno y existe un comercio internacional de amoníaco bien consolidado⁵¹. El amoníaco se utiliza actualmente como materia prima, en particular para producir fertilizantes, pero también puede utilizarse como combustible para la descarbonización, por ejemplo, en el sector del transporte marítimo. La desventaja es que el amoníaco es tóxico si se producen fugas y es también una posible fuente de emisiones de óxido de nitrógeno. En septiembre de 2020, Arabia Saudí envió su primera carga de «amoníaco azul» (producido mediante gas natural con captura y almacenamiento de carbono) a Japón, donde se utilizó para producir energía eléctrica.

El metanol, la forma más sencilla de alcohol, puede producirse con hidrógeno y CO_2 . Con la mitad de la densidad energética del gasóleo de calefacción, este combustible sería muy apropiado para aplicaciones del transporte. La mayor planta de síntesis de metanol está situada en Islandia, donde utiliza una combinación de energía geotérmica e hidráulica para generar más de cinco millones de litros de metanol al año, parte del cual se exporta a los Países Bajos. Como la energía procede de los volcanes, el metanol verde toma la marca de «Vulcanol»⁵².

Hubs y valles del hidrógeno

Aunque el hidrógeno podría convertirse en una materia prima mundial, es probable que los primeros pasos sean más modestos. En la actualidad, aproximadamente el 85 % de todo el hidrógeno continúa produciéndose y consumiéndose en lugares específicos (p. ej., en refinerías). Ampliar la infraestructura de suministro y demanda del hidrógeno podría lograrse mediante *hubs* indus-

⁵¹ Royal Society, «Ammonia: Zero-Carbon Fertiliser, Fuel and Energy Store». Policy Briefing, febrero de 2020.

⁵² Carbon Recycling International. Disponible en: <https://www.carbonrecycling.is/>. Consulta el 13 de enero de 2021.

triales, especialmente en diferentes zonas costeras. Varias estrategias nacionales de hidrógeno se dirigen al establecimiento de estos «valles del hidrógeno» o *hubs* (p. ej., puertos o ciudades). Desde ellos, podrían construirse «corredores de hidrógeno» que conecten las regiones con alto potencial para las energías renovables con los centros de demanda.

Con el tiempo, el mercado del hidrógeno podría llegar a emular el mercado del gas natural: Norteamérica siendo más que autosuficiente, Europa importando algo de hidrógeno a través de redes desde los países vecinos y Japón confiando en el transporte de hidrógeno por vía marítima. Sin embargo, una diferencia clave con el gas natural es que todos los principales países (incluidos los importadores, como Europa, Corea y Japón) serán «prosumidores», es decir, tanto productores como consumidores de hidrógeno y sus productos derivados. Otra diferencia es que los importadores concienciados con el cambio climático desearán contar con certificados o garantías de origen para estar seguros de que el hidrógeno que obtienen es del «color» apropiado. Así pues, hay algunas diferencias entre distintos importadores. Los futuros importadores asiáticos parecen seguir la estrategia de hidrógeno «primero gris, después azul y después verde», mientras que Alemania en particular está decidida a saltar directamente al hidrógeno verde lo antes posible.

Principales agentes en la geopolítica del hidrógeno

En su influyente trabajo, *The Prize*, Daniel Yergin explica cómo el petróleo se convirtió en la fuente de energía más importante del mundo. Así, describe cómo el petróleo es un área de «riesgos enormes y recompensas monumentales»⁵³, tanto en el ámbito comercial como geopolítico. El hidrógeno parece estar bien situado para convertirse en el «siguiente gran premio», una versión sin carbono del petróleo⁵⁴. Al igual que en la industria del petróleo, las compañías privadas y los países están maniobrando para controlar o, al menos, lograr establecerse en este negocio emergente y potencialmente lucrativo, que tiene la posibilidad de «redibujar fundamentalmente la geografía del comercio energético mundial, crear una nueva clase de exportadores de

⁵³ YERGIN, Daniel: *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money and Power*. Nueva York: Simon and Schuster, 1991.

⁵⁴ VAN DE GRAAF, Thijs: «The Next Price: Geopolitical Stakes in the Clean Hydrogen Race». Oxford Energy Forum, forthcoming.

energía, y remodelar las relaciones geopolíticas y las alianzas entre países»⁵⁵.

¿Quién será la superpotencia del hidrógeno?

Los dos últimos años, en particular, representan un momento potencialmente revolucionario para el sector del hidrógeno. Más de 20 gobiernos han anunciado, redactado, o publicado estrategias u hojas de ruta nacionales para el hidrógeno en los dos últimos años⁵⁶, como Francia (2018, actualizado en 2020), Japón y Australia (2019) y Noruega, Alemania, la UE, Portugal, España, Chile y Finlandia (todos ellos en 2020)⁵⁷. También se han redactado planes sobre el hidrógeno a otras escalas políticas, incluidos estados como California⁵⁸, regiones como el norte de Inglaterra⁵⁹ y ciudades como Londres⁶⁰. Algunos paquetes de recuperación tras la COVID-19 han incluido también respaldo para el hidrógeno (limpio)⁶¹.

Estos planes nacionales y subnacionales revelan que algunos países van dirigidos a convertirse en importadores de hidrógeno a gran escala (en particular Japón, Alemania y Corea), mientras que otros aspiran a convertirse en exportadores a gran escala (en particular, Australia, Chile y Marruecos), a los que en ocasiones se denomina «regiones superpotencia en energías renovables»⁶². Algunos países exportadores de combustibles fósiles

⁵⁵ VAN DE GRAAF, Thijs; OVERLAND, Indra; SCHOLTEN, Daniel y WESTPHAL, Kirsten: «The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen». *Energy Research & Social Science* 70 (2020): 101667.

⁵⁶ KOSTURJAK, Anthony; DEY, Tania; YOUNG, M. y WHETTON, Steve: «Advancing Hydrogen: Learning from 19 plans to advance hydrogen from across the globe». *Future Fuels CRC* (2019).

⁵⁷ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen: A Guide To Policy-Making». Abu Dabi: IRENA. Noviembre de 2020, p. 22.

⁵⁸ Renewable Hydrogen Roadmap, report prepared by Energy Independence Now for California Hydrogen Business Council. Mayo de 2018. Disponible en: <https://einow.org/rh2roadmap>. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁵⁹ H21: Norte de Inglaterra, informe emitido por Northern Gas Networks, Equinor y Cadent, 2018. Disponible en: <https://www.northerngasnetworks.co.uk/event/h21-launches-national/>. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁶⁰ Element Energy Ltd. (2016), London: a capital for hydrogen and fuel cell technologies, report prepared for Hydrogen London. Disponible en: <http://www.hydrogen-london.org/hydrogen-londonprojects-events-and-publications/publications/>. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁶¹ International Energy Agency (IEA), «World Energy Outlook 2020». París: OECD/IEA, nota al pie 8 en la página 290.

⁶² LIEBREICH, Michael, «Separating Hype from Hydrogen – Part One: The Supply Side». 8 de octubre de 2020. Disponible en: <https://about.bnef.com/blog/liebreich-se->

(p. ej., Arabia Saudí) están comenzando a realizar tímidas apuestas a favor del hidrógeno para sustituir los ingresos derivados de las exportaciones de gas y petróleo, a medida que cada vez más países adoptan estrategias de emisiones cero. No obstante, lo más destacable es que todos son potencias medias. La mayoría de las grandes potencias y las actuales potencias emergentes (Estados Unidos, China, Rusia, la India y Brasil) probablemente se orienten hacia la autosuficiencia en hidrógeno.

En un reciente estudio, Pflugmann y De Blasio, académicos de Harvard, dibujaron el mapa geopolítico del hidrógeno renovable. En función de tres parámetros (potencial de recursos de energías renovables, recursos hídricos renovables y potencial de infraestructuras (medido mediante la puntuación de infraestructuras del país en el índice de competitividad del World Economic Forum)) identifican cinco posiciones de países arquetipo, que se muestran en la tabla siguiente.

Función	Recursos de energías renovables	Disponibilidad de agua dulce	Potencial de infraestructuras	Ejemplos de países
«Líderes en exportación»	Muy altos	Alta	Alta	Australia, Estados Unidos, Marruecos, Noruega
«Productores con limitaciones de agua»	Muy altos	Muy baja	Alta	Arabia Saudí, posiblemente China
«Grandes importadores»	Bajos	Alta	Alta	Japón, Corea, partes de la UE
«Productores autosuficientes»	Altos	Alta	Alta	Turquía, España, Tailandia
«Productores con limitaciones de infraestructuras»	Altos	Media	Baja	La India, la mayor parte de Sudamérica, posiblemente Rusia

Tabla 3. Funciones que desempeñan los países arquetipo en los mercados del hidrógeno renovable. Fuente: adaptado de Pflugmann y De Blasio (2020)63.

parating-hype-from-hydrogen-part-one-the-supply-side/. Consulta el 13 de enero de 2021.

⁶³ PFLUGMANN, Fridolin; and DE BLASIO, Nicola: «The Geopolitics of Renewable Hydrogen in Low-Carbon Energy Markets». *Geopolitics, History, and International Relations* 12, n.º 1 (2020): 9-44.

En un enfoque algo más sofisticado, que tiene en cuenta otras variables, como la densidad de población, el entorno empresarial, la estabilidad política y la superficie de terreno disponible, una consultoría alemana identificó nada menos que 23 países con gran potencial para las exportaciones Power-to-X (PtX). Se muestran en la Figura 3.

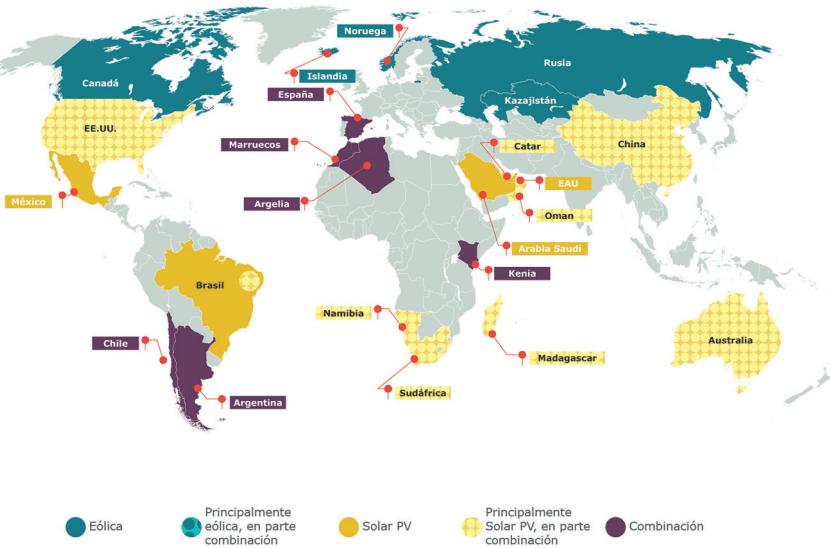


Figura 3. Países con el mayor potencial para exportaciones PtX. Fuente: Frontier Economics (2018), p. 43⁶⁴.

Un análisis pormenorizado de cada uno de estos agentes queda fuera del alcance de este capítulo. No obstante, las siguientes secciones abordarán una selección de países pioneros en el desarrollo de mercados para el hidrógeno (futuros importadores) y en el desarrollo de la producción de hidrógeno (futuros exportadores). Las dos regiones más prometedoras para establecer un comercio internacional del hidrógeno son (1) Asia-Pacífico, donde Japón, Corea, Singapur y China podrían surgir como grandes centros de demanda, y Australia, Brunéi y Nueva Zelanda podrían convertirse en proveedores; y (2) Europa, donde países como Alemania, los Países Bajos, Francia y Bélgica podrían obtener importaciones desde Noruega, África del Norte y Oriente Medio.

⁶⁴ Frontier Economics, «International Aspects of a Power-to-X Roadmap: A report prepared for the World Energy Council Germany». 18 de octubre de 2018. Disponible en: <https://www.frontier-economics.com/media/2642/frontier-int-ptx-roadmap-stc-12-10-18-final-report.pdf>. Consulta el 13 de enero de 2021.

Países de vanguardia seleccionados

Japón

Japón es el pionero por excelencia en lo que respecta al hidrógeno. En 2017, anunció su propósito de convertirse en lo que denomina una «sociedad basada en el hidrógeno», que prevé un uso generalizado del hidrógeno en todos los sectores de la economía⁶⁵. Este plan está respaldado por una considerable inversión del gobierno en tecnologías e infraestructuras relacionadas con el hidrógeno. En 2019, Japón hizo del hidrógeno lo más prioritario de la agenda internacional al convocar una reunión ministerial del G20 sobre el hidrógeno. Para demostrar su compromiso con el hidrógeno, Japón construyó la Villa Atlética para los Juegos Olímpicos de Tokio 2020 (ahora pospuestos hasta 2021 debido a la COVID-19) como una sociedad en miniatura basada en el hidrógeno. La antorcha olímpica también estaba alimentada con hidrógeno. Como señaló el gobernador de Tokio: «Los Juegos Olímpicos de Tokio 1964 nos dejaron como legado el sistema de tren de alta velocidad Shinkansen. Los próximos Juegos Olímpicos nos dejarán una sociedad basada en el hidrógeno como legado»⁶⁶.

Japón importa actualmente todo el gas y petróleo que necesita, y parece dispuesto a importar también una proporción considerable de sus necesidades de hidrógeno. Ha desplegado una extensa diplomacia sobre el hidrógeno para encontrar socios internacionales a fin de desarrollar una cadena de suministro de hidrógeno, aumentar la escala de producción y reducir costes. Japón fue el primer país que empezó a buscar socios extranjeros capaces de exportar hidrógeno. Sus miembros industriales son socios participantes en Australia, Brunéi, Noruega y Arabia Saudí dedicados a la adquisición de combustible hidrógeno⁶⁷. Esto ya ha producido algunos resultados significativos. En junio de 2020, Japón reci-

⁶⁵ Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry, «Basic Hydrogen Strategy». 26 de diciembre de 2017. Disponible en: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

⁶⁶ Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, «Japan's Hydrogen Olympics». 25 de mayo de 2020. Disponible en: <http://www.fchea.org/in-transition/2020/5/25/japans-hydrogen-olympics>. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁶⁷ NAGASHIMA, Monica: «Japan's Hydrogen Strategy and Its Economic and Geopolitical Implications». IFRI, octubre de 2018. Disponible en: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf. Consulta el 12 de enero de 2021.

bió una primera carga de portador de hidrógeno orgánico líquido (Liquid organic hydrogen carrier LOHC) desde Brunéi (basado en gas natural), y pronto comenzará con envíos de prueba desde Australia (basados en carbón). En septiembre de 2020, Arabia Saudí envió una primera carga de «amoníaco azul» (producido mediante gas natural con captura y almacenamiento de carbono) a Japón, donde se utilizará para producir energía eléctrica.

Parece que Japón será otra vez un pionero en el mercado mundial del gas. Ya ayudó a crear un mercado global para el gas natural licuado (GNL). Ahora parece preparado para tener el mismo éxito con el hidrógeno⁶⁸. El objetivo subyacente es alcanzar la paridad de costes para el hidrógeno con el GNL, el principal combustible en el *mix* de energía de Japón después del desastre nuclear de Fukushima. Con este objetivo, Japón está tratando de firmar acuerdos de suministro a largo plazo como los que promovieron el mercado del GNL⁶⁹.

Unión Europea

La Unión Europea, que se propone alcanzar la neutralidad en carbono para el año 2050, también prevé importaciones de hidrógeno a gran escala. Una alianza industrial europea ha desarrollado un plan para construir 2x40 GW de electrolizadores para el 2030, 40 GW en Europa y 40 GW en los países vecinos a Europa para exportar hidrógeno a la UE.⁷⁰ Esta propuesta se reiteró en la Estrategia de Hidrógeno de la UE, publicada en julio de 2020, que incluía el ambicioso objetivo de instalar 40 GW de electrolizadores de hidrógeno renovable en la UE para el 2030⁷¹. Europa tiene una marcada preferencia por el hidrógeno verde, al contrario que los centros de demanda emergentes en Asia (Japón, Corea y China), que apuestan por el hidrógeno gris, azul y verde en las próximas décadas para ampliar el mercado⁷².

⁶⁸ VAN DE GRAAF, Thijs; OVERLAND, Indra; SCHOLTEN, Daniel y WESTPHAL, Kirsten: «The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen». *Energy Research & Social Science* 70 (2020): 101667.

⁶⁹ Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry, «Basic Hydrogen Strategy». 26 de diciembre de 2017. Disponible en: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

⁷⁰ <https://www.hydrogen4climateaction.eu/2x40gw-initiative>.

⁷¹ European Commission, «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe». Bruselas, 8 de julio de 2020.

⁷² NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; and HAFNER, Manfred: «The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective». *Sustainability* 13, nº. 1 (2021), p. 297.

La estrategia nacional del hidrógeno de Alemania no solo prevé 7000 millones de euros para la producción nacional de hidrógeno verde, sino también 2000 millones para la producción en el extranjero⁷³. Alemania está explorando actualmente importaciones desde países tan diversos como Marruecos, la República Democrática del Congo (RDC) e incluso la lejana Australia. No obstante, puede tener sentido concentrarse primero en las importaciones desde Europa del Este y del Sur, así como desde Ucrania. Después de todo, estos países están integrados en el mercado energético común a nivel normativo (p. ej., a través de la Comunidad Europea de la Energía) y, en muchos casos, ya existen redes de infraestructura (gas) que podrían utilizarse para el comercio del hidrógeno⁷⁴.

No obstante, algunos países en la UE podrían convertirse en exportadores netos de hidrógeno. La estrategia de hidrógeno de Portugal, por ejemplo, está orientada a convertir el país en un exportador de hidrógeno para el año 2030. El país puede beneficiarse de precios muy competitivos para la producción de electricidad renovable y de una ubicación geográfica estratégica para la exportación. Ya ha firmado un acuerdo con los Países Bajos para exportar hidrógeno verde desde el puerto de Sines a Róterdam, un proyecto que la UE ha diseñado como una prioridad estratégica⁷⁵. España también alimenta la ambición de convertirse en un exportador de moléculas verdes. La compañía eléctrica española Iberdrola y el fabricante de fertilizantes Fertiberia han revelado sus planes para la exportación de amoníaco verde a gran escala⁷⁶. Estos dos países, al igual que Italia, podrían convertirse

⁷³ The German Federal Government, «The National Hydrogen Strategy». Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Junio de 2020. Disponible en: https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

⁷⁴ WESTPHAL, Kirsten; DRÖGE, Susanne; and GEDEN, Oliver, «The international dimensions of Germany's hydrogen policy». SWP, Berlín. Junio de 2020. Disponible en: https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/comments/2020C32_HydrogenPolicy.pdf. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁷⁵ Memorandum of understanding between Portugal and the Netherlands concerning green hydrogen. 17 de agosto de 2020. Disponible en: <https://www.government.nl/documents/publications/2020/09/23/memorandum-of-understanding-between-the-netherlands-and-portugal-concerning-green-hydrogen>. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁷⁶ MILLAN LOMBRANA, Laura: «Spain Could Become Green-Ammonia Exporter With Hydrogen Project». 28 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-10-28/spain-could-become-green-ammonia-exporter-with-hydrogen-project>. Consulta el 12 de enero de 2021.

en países relevantes para el tránsito de gas hidrógeno, importando hidrógeno producido a partir de energía solar y eólica en África del Norte, y exportándolo a otros países europeos a través de la actual infraestructura de gas⁷⁷.

Australia

Pocos países están en mejor posición que Australia para convertirse en un exportador a nivel mundial de hidrógeno verde y sus moléculas derivadas (amoníaco, metanol), gracias a sus ingentes recursos de energías renovables y reservas de carbón. La estrategia nacional del hidrógeno de Australia, publicada a finales de 2019, da prioridad al establecimiento de una industria exportadora de hidrógeno competitiva para satisfacer los mercados de Japón, Corea, Singapur y Taiwán⁷⁸.

El Asian Renewable Energy Hub, un enorme proyecto de hidrógeno verde, se encuentra ya en una fase avanzada de planificación. Se propone construir el parque solar y eólico más grande del mundo (y también la mayor central eléctrica de la tierra) en un solar de 6500 km² en la región de Pilbara, una remota zona desértica en Australia Occidental⁷⁹. Una vez completada, la instalación tendrá una capacidad de 23 GW para producir hidrógeno y amoníaco verdes, la mayor parte de los cuales se exportarán a Asia⁸⁰.

Chile

Chile, otra nación bañada por el sol, se propone convertirse en un exportador de hidrógeno y amoníaco verdes, principalmente para atender los mercados emergentes en Europa, al menos en un principio. Chile cuenta con uno de los mejores recursos solares del mundo en regiones como el desierto de Atacama, con más de

⁷⁷ SNAM, «The Hydrogen Challenge: The potential of hydrogen in Italy». Position Paper, 10 de octubre de 2019. Disponible en: https://www.snam.it/it/hydrogen_challenge/repository_hy/file/The-H2-challenge-Position-Paper.pdf. Consulta el 12 de enero de 2021.

⁷⁸ Commonwealth of Australia, «Australia's National Hydrogen Strategy». 2019. Disponible en: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>. Consulta el 13 de enero de 2021.

⁷⁹ SMITH, Jamie: «Australia backs desert project to export green hydrogen to Asia». *Financial Times*, 22 de octubre de 2020.

⁸⁰ Asian Renewable Energy Hub. Disponible en: <https://asianrehub.com/about/>. Consulta el 13 de enero de 2021.

3000 horas de sol y menos de 2 milímetros de precipitaciones al año. El país está adoptando un enfoque más modesto en comparación con Australia: espera alcanzar 5 GW en capacidad de electrolizadores en 2025, producir el hidrógeno más barato del mundo en 2030 y convertirse en uno de los tres mayores exportadores de hidrógeno en 2040⁸¹. La propuesta chilena se basa en una combinación de energía solar fotovoltaica (FV) y energía solar concentrada (CSP), que daría como resultado un factor de capacidad combinado de más del 50 % y podría producir hidrógeno a un coste nivelado de unos 2,7 USD/kg, según la IRENA⁸², aunque McKinsey lo sitúa a un nivel de 1,3 USD/kg⁸³. Según el Ministro de Energía, Juan Carlos Jobet, el país podría estar exportando hidrógeno verde por valor de 30 000 millones de USD para el año 2030⁸⁴. Es una cifra similar al tamaño presente de sus exportaciones de cobre, el sustento actual de la economía de Chile.

Dimensiones geopolíticas del hidrógeno

Durante décadas, la geopolítica de la energía ha girado en torno a los combustibles fósiles y al petróleo en particular⁸⁵. Dado que las nuevas fuentes de energía, en especial la solar y la eólica, han alcanzado reducciones de costes espectaculares, comienza a esbozarse un nuevo orden energético. La electrificación será el camino más eficiente para abatir las emisiones en gran parte de nuestra demanda energética. Sin embargo, la descarbonización de otros sectores exigirá soluciones diferentes, más basadas en moléculas que en electrones. Muchas de las vías hacia las moléculas neutras en carbono implican hidrógeno, ya sea en forma pura (H₂) o como un compuesto (p. ej., amoníaco o NH₃).

⁸¹ GABEL, Etienne: «Big ambitions: How Chile aims to be among the largest exporters of green hydrogen in the world». IHS Markit, 22 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://ihsmarkit.com/research-analysis/big-ambitions-how-chile-aims-to-be-among-the-largest-exporters.html>. Consulta el 13 de enero de 2021.

⁸² IRENA, «Hydrogen: A Renewable Energy Perspective». Informe preparado para la segunda Hydrogen Energy Ministerial Meeting en Tokio, Japón. Septiembre de 2019, p. 36. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf. Consulta el 11 de enero de 2021.

⁸³ Gobierno de Chile, «Estrategia Nacional De Hidrógeno Verde». Noviembre de 2020. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf. Consulta el 13 de enero de 2021.

⁸⁴ MANDER, Benedict, «Chile seeks to turn solar boom into green hydrogen bonanza». *Financial Times*, 31 de agosto de 2020.

⁸⁵ VAN DE GRAAF, Thijs y SOVACOO, Benjamin K.: *Global Energy Politics*, Polity, 2020.

A continuación, identifico y describo seis dimensiones geopolíticas del hidrógeno:

- En primer lugar, el hidrógeno ya está impulsando una carrera por el liderazgo tecnológico. Por razones estratégicas, los países desean ser quienes crean la tecnología, y no quienes la utilizan, en el caso de las tecnologías clave para el futuro, y el hidrógeno no es una excepción.
- En segundo lugar, los países también están desplegando en paralelo nuevas políticas industriales (verdes), a menudo con el respaldo de políticas comerciales (proteccionistas). El hidrógeno es un importante elemento de debate sobre la industrialización (en economías emergentes y en desarrollo) y sobre cómo evitar la deslocalización de sectores o incluso la relocalización de sectores «perdidos» (en economías industrializadas).
- En tercer lugar, el hidrógeno plantea tanto amenazas como oportunidades para los países productores de combustibles fósiles. Algunos de ellos, como Arabia Saudí y EAU, parecen interesados en subirse al tren del hidrógeno. Si bien esto puede convertirlos en agentes que apoyen más el programa contra el cambio climático, existe el riesgo de que emprendan el camino del hidrógeno o amoníaco azul que, a largo plazo, no resulta compatible con los objetivos de cero emisiones netas.
- En cuarto lugar, el hidrógeno podría promover nuevas interdependencias entre países. Como resultado, podrían alterarse las alianzas y relaciones políticas, y surgir nuevos riesgos para la seguridad del suministro.
- En quinto lugar, las infraestructuras de hidrógeno son intensivas en capital, pero pueden tomar vías completamente diferentes. En un futuro con restricciones del carbono, los principales competidores serán los hidrógenos azul y verde. La sobreinversión en el hidrógeno azul podría, no obstante, dar lugar a un bloqueo de carbono (*carbon lock-in*) (que supone una amenaza para la mitigación del cambio climático) o activos varados (si se aplican férreamente las políticas de mitigación del cambio climático).
- Por último, y en sexto lugar, la competencia geopolítica también es evidente en el ámbito de la gobernanza y la regulación de los mercados. Los países y las empresas chocan en cuestiones como los estándares técnicos, los marcos de certificación y las garantías de origen. No existe un solo escenario institucional en la gobernanza mundial donde se debata

sobre el hidrógeno, un espacio abierto para la competencia interinstitucional.

- Los siguientes subapartados abordarán cada una de estas dimensiones sucesivamente.

La carrera por el liderazgo tecnológico

Controlar las cadenas de valor de las tecnologías de energía baja en carbono es vital para la competitividad económica, la seguridad nacional y la independencia energética de todos los países. Los pioneros en el sector del hidrógeno podrían ser capaces de vender su tecnología al resto del mundo. El liderazgo tecnológico podría desarrollarse en torno a numerosos aspectos de la cadena de valor del hidrógeno, incluidas las membranas para pilas de combustible, electrolizadores o tanques de almacenamiento a alta presión.

El auge previsto en el hidrógeno podría crear grandes mercados nuevos e impulsar una carrera por el liderazgo tecnológico. McKinsey y el Hydrogen Council estiman que, para el 2050, las ventas del hidrógeno como una materia prima y los equipos relacionados (como electrolizadores, estaciones de repostaje de hidrógeno y pilas de combustible) podrían alcanzar un valor de 2500 billones de dólares al año y generar 30 millones de empleos⁸⁶. Bloomberg New Energy Finance (BNEF) opina que el hidrógeno podría generar una oportunidad de inversión de hasta 11 billones de dólares en los próximos 30 años⁸⁷.

Así, el hidrógeno es solo otro campo de batalla para la supremacía tecnológica y económica entre las potencias establecidas y emergentes de este mundo. Al igual que el ascenso estadounidense a la supremacía mundial en el siglo XX vino de la mano del petróleo, ahora los países tratan de controlar las principales tecnologías energéticas del futuro: no solo el hidrógeno, sino también la energía solar, las baterías, las redes digitales, los vehículos eléctricos, etc. En estos ámbitos esenciales, los países tienen un interés estratégico en ser creadores de tecnología y no tomadores de tecnología.

Este cálculo geoeconómico ya está influyendo en las políticas del hidrógeno. El enorme impulso de Alemania al hidrógeno verde,

⁸⁶ Hydrogen Council (2017). Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition. Noviembre de 2017.

⁸⁷ BNEF (2020). Hydrogen Economy Outlook. 30 de marzo de 2020.

por ejemplo, es una clara apuesta por superar a China, tras haber sufrido la dolorosa experiencia de perder su industria de producción de energía solar fotovoltaica FV ante China hace algunos años⁸⁸. Si bien China ha hecho mucho para reducir el coste unitario de las energías fotovoltaica y eólica, también ha adquirido posiciones dominantes en las cadenas de valor de estas y otras tecnologías energéticas, como vehículos eléctricos y tierras raras. China produce más de una tercera parte de las turbinas eólicas, más de la mitad de todos los vehículos eléctricos y más del 70 % de los paneles solares del mundo⁸⁹.

Los electrolizadores tienen el mismo tipo de modularidad que los paneles solares FV o las baterías, por lo que podrían experimentar el mismo tipo de deflación de precios que hemos observado para estas tecnologías. BNEF estima que, desde 2019, los electrolizadores eran ya un 83 % más baratos de producir en China que en los países occidentales⁹⁰. Es cierto que los fabricantes chinos se concentran en los electrolizadores alcalinos más estándares, menos flexibles que las tecnologías de membrana de intercambio de protones y óxido sólido en las que se han centrado las compañías europeas. Pero, en muchos aspectos, parece que la carrera ya se ha disputado. Será difícil que los fabricantes europeos derroten a China en costes.

La carrera por el liderazgo tecnológico es evidente en muchos países y sectores. Pensemos, por ejemplo, en la automoción. Los fabricantes de automóviles japoneses Honda y Toyota están apostando a que los vehículos de pila de combustible triunfarán sobre las baterías, especialmente en términos de autonomía, mientras que los fabricantes chinos están realizando grandes avances en vehículos eléctricos y los fabricantes alemanes se han centrado desde hace tiempo en aumentar la eficiencia de los motores de combustión diésel. En muchos casos, el dinero público apoya los esfuerzos para desplegar las cadenas de valor del hidrógeno, de forma que se convierte aún más en terreno abonado para la competición geo-económica. Por eso, la Comisión Europea ha anunciado que pronto lanzará una alianza europea del hidrógeno en un documento reciente sobre una «nueva estrategia industrial

⁸⁸ AMELANG, Sören (2020). Europe vies with China for clean hydrogen superpower status. *Clean Energy Wire*, 24 de julio de 2020. <https://www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status>.

⁸⁹ LADISLAW, Sarah y TSAFOS, Nikos: «Beijing is Winning the Clean Energy Race». *Foreign Policy*, 2 de octubre de 2020.

⁹⁰ BNEF (2020). *Hydrogen Economy Outlook*. 30 de marzo de 2020.

para Europa»⁹¹. Siguiendo una línea similar, la UE ha lanzado recientemente una alianza europea de las baterías y una alianza europea de las materias primas para intentar alcanzar a China.

Al igual que otras partes de la transición hacia las energías limpias, las cadenas de valor del hidrógeno son también intensivas en minerales y metales. Se necesitan unas 30 materias primas para producir pilas de combustible e infraestructura para el almacenamiento del hidrógeno, 13 de las cuales son consideradas críticas por la UE: cobalto, magnesio, elementos de tierras raras, platino, paladio, boratos, silicio metálico, rodio, rutenio, grafito, litio, titanio y vanadio. La Figura 4 muestra algunas de las materias primas relevantes que son necesarias para producir pilas de combustible. En particular, las pilas de combustible dependen notablemente de catalizadores a base de platino, y el platino representa alrededor de la mitad del coste de una pila de combustible.

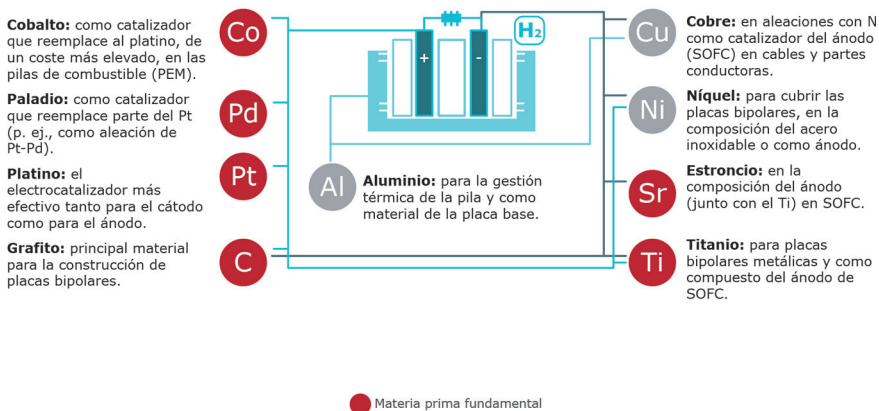


Figura 4. Materias primas relevantes utilizadas en pilas de combustible.
Fuente: Comisión Europea (2020) .

Competencia geoeconómica

El surgimiento de las cadenas de valor intercontinentales del hidrógeno también intensificará la competencia entre países sobre la ubicación de las industrias intensivas en energía y expuestas al comercio. Los países con mucho potencial para producir hidrógeno a partir de recursos propios (ya sean renovables o combus-

⁹¹ EU Commission (2020). A New Industrial Strategy for Europe. COM(2020) 102 final. 10 de marzo de 2020.

tibles fósiles) podrían decantarse por expandir sus cadenas de valor hacia industrias intensivas en energía, como los productos químicos y el acero, en lugar de limitarse a exportar el hidrógeno a los países industrializados. El país modelo que suele citarse en este sentido es Islandia, antaño uno de los países más pobres de Europa, pero que fue capaz de industrializarse y atraer industrias intensivas en energía (exportación) como la fundición de aluminio, la producción de ferrosilicio y el procesamiento de datos digitales gracias a su energía hidráulica y geotérmica abundante y barata. Podría argumentarse que Islandia está exportando su energía barata como datos de alto valor⁹².

En una línea similar, el Grattan Institute, un *think-tank* australiano, publicó un informe en mayo de 2020 titulado «Start with steel», que afirmaba que Australia debía utilizar sus abundantes energías renovables, no para exportar hidrógeno como portador de energía, sino para atraer nuevas industrias manufactureras en la producción de acero y amoníaco⁹³. Así, esta industrialización verde impulsada por las energías renovables permitiría realizar una «transición justa» para los trabajadores actualmente empleados en sectores intensivos en carbono.

No obstante, en muchos casos se considera a los países en desarrollo exclusivamente como proveedores de las materias primas y los recursos energéticos para alimentar los núcleos industriales del mundo desarrollado, no como destinos para la reubicación de industrias con alto valor añadido. Algunos de los acuerdos comerciales sobre el hidrógeno que están firmándose actualmente huelen a «colonialismo verde»⁹⁴. Un ejemplo es el plan de los fabricantes de turbinas y las compañías gasísticas alemanas de exportar hidrógeno verde producido con energía hidráulica en la República Democrática del Congo (RDC) a Alemania⁹⁵. Este

⁹² LAURSEN, Lucas: «Iceland Exports Energy as Data». *MIT Technology Review*, 11 de abril de 2012. Disponible en: <https://www.technologyreview.com/2012/04/11/186812/iceland-exports-energy-as-data/>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁹³ «Start with Steel: A practical plan to support carbon workers and cut emissions». Disponible en: <https://grattan.edu.au/report/start-with-steel/>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁹⁴ VAN DE GRAAF, Thijs; OVERLAND, Indra; SCHOLTEN, Daniel y WESTPHAL, Kirsten: «The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen». *Energy Research & Social Science* 70 (2020): 101667.

⁹⁵ BAX, Pauline: «Congo Hydrogen Plant Being Considered by European Turbine Makers». *Bloomberg Green*, 21 de agosto de 2020. Disponible en: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-08-21/congo-hydrogen-plant-being-considered-by-european-turbine-makers>. Consulta el 14 de enero de 2021.

proyecto es tan polémico porque solo el 10 % de la población de la RDC dispone de acceso a la electricidad⁹⁶. No obstante, la agencia alemana para el desarrollo está patrocinando la creación de un «atlas» con ubicaciones favorables en África para la producción de hidrógeno verde⁹⁷.

La política industrial ha dejado de ser un tabú en el mundo industrializado. Los impactos en la cadena de suministro y la disrupción económica provocada por la pandemia de la COVID-19 han motivado incluso a los gobiernos del mundo más orientados al mercado para plantearse políticas más dirigistas, inconcebibles hace solo algunos años. Aumentan cada vez más las llamadas a una relocalización de industrias importantes, no solo en los sectores médico y farmacéutico, sino también en las industrias energéticas. Mientras que China cuenta con su plan «Made in China 2025», Europa intenta ahora resistir y desarrollar sus propios planes industriales en ámbitos como las baterías, el hidrógeno y las materias primas.

El futuro de los petroestados

Con respecto al impacto del hidrógeno sobre los países productores de combustibles fósiles, en ocasiones denominados también «petroestados», existen esencialmente dos escuelas de pensamiento⁹⁸. Una escuela considera que el hidrógeno, y en particular el hidrógeno verde, es una oportunidad para que los países dependientes de las importaciones sustituyan las importaciones de combustibles fósiles, a menudo procedentes de regiones del mundo geopolíticamente inestables, y para diversificar el suministro energético. La otra escuela lo ve del modo opuesto: una repentina caída en los ingresos de las exportaciones a causa de la sustitución del petróleo podría desestabilizar geopolíticamente los países productores, con efectos concomitantes sobre los flu-

⁹⁶ GAVENTA, Jonathan: «Will the dash for hydrogen benefit sub-Saharan Africa?» *Energy Monitor*, 21 de octubre de 2021. Disponible en: <https://energymonitor.ai/technology/hydrogen/will-the-dash-for-hydrogen-benefit-sub-saharan-africa>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁹⁷ Para más información véase: <https://www.sasscal.org/atlas-of-green-hydrogen-generation-potentials-in-africa/>. Consulta el 14 de enero de 2021.

⁹⁸ VAN HULST, Noé: «An International Perspective on Clean Hydrogen». *Nederlandse Vereniging voor de Verenigde Naties*, 22 de abril de 2020. Disponible en: <https://nvvn.nl/an-international-perspective-on-clean-hydrogen/>. Consulta el 15 de enero de 2021.

jos migratorios y la seguridad internacional⁹⁹. El hidrógeno, y el amoníaco azul y verde, podrían ser una tabla salvavidas para los países productores e incluso permitirles comprometerse con los debates sobre el cambio climático global, donde actualmente a menudo están enfrentados con los países en la vanguardia de la lucha contra el cambio climático, que desean acelerar la transición energética y abandonar los combustibles fósiles cuanto antes¹⁰⁰.

Varios países identificados como candidatos a convertirse en campeones de la exportación del hidrógeno ya desempeñan un papel destacado en el sistema actual de energía de combustibles fósiles. Tal es el caso, por ejemplo, de Australia, Estados Unidos y Arabia Saudí. El hidrógeno permitiría a estos países «mantener el modelo de negocio básico de la era del petróleo, basado en la producción barata de un combustible de uso universal para el transporte y la generación de calor»¹⁰¹. Para algunos de estos agentes energéticos consolidados, como Arabia Saudí, parece poco probable que se puedan generar los mismos ingresos con las exportaciones de hidrógeno o amoníaco que con las exportaciones de petróleo y gas. Se encuentran ante el dilema de que sus exportaciones de moléculas verdes se enfrentarían a la competencia y posiblemente destruirían la demanda de sus exportaciones de combustibles fósiles, mucho más lucrativas. A diferencia del negocio del petróleo, en una economía basada en el hidrógeno, los petroestados deberán competir con un mayor número de países, principalmente aquellos situados en el cinturón solar del mundo y algunos países con viento abundante, como Argentina y Chile. Si pueden convertirse en pioneros, podrían captar parte de la demanda de hidrógeno emergente durante un largo periodo de tiempo, especialmente si logran acordar contratos de suministro a largo plazo (que garanticen la viabilidad de las inversiones)¹⁰².

⁹⁹ IRENA, *A New World: The Geopolitics of the Energy Transformation*, Abu Dabi: IRENA.

¹⁰⁰ BRADSHAW, Michael, VAN DE GRAAF, Thijs y CONNOLLY, Richard: «Preparing for the new oil order? Saudi Arabia and Russia». *Energy Strategy Reviews* 26 (2019): 100374.

¹⁰¹ MICHAELOWA, Axel and BUTZENGEIGER, Sonja: «Breakthrough of Hydrogen Technologies until 2030: Chances and Risks for Gulf Countries, International Policy Implications», en EDA Insights. Septiembre de 2019. Disponible en: https://eda.ac.ae/docs/default-source/Publications/eda-insight_hydrogen-economy_en_final.pdf?sfvrsn=2. Consulta el 15 de enero de 2021.

¹⁰² MICHAELOWA and BUTZENGEIGER, 2019.

No es necesario decir que, en cualquier escenario compatible con los objetivos climáticos de París, el alza del hidrógeno irá de la mano con una reducción de los mercados de los combustibles fósiles. La desventaja de las oportunidades de inversión que presenta el hidrógeno son los ingresos a los que renuncian los actuales productores de gas y petróleo, posiblemente del orden de miles de millones o billones de dólares. Mientras que la industria del carbón ha sentido los efectos negativos de las renovables ultracompetitivas desde el principio, especialmente en Europa, la industria del gas y el petróleo se ha mantenido durante mucho tiempo relativamente aislada de estos electrones más baratos, que de todos modos atendían a mercados diferentes. La electrificación de varios sectores de uso final (p. ej., vehículos personales o la calefacción doméstica) ha comenzado ya a modificar este panorama. Con el tiempo, el hidrógeno más barato tiene la posibilidad de convertirse en un competidor del gas y el petróleo en algunos de sus últimos reductos: los procesos industriales con altas temperaturas, el transporte pesado por carretera, el transporte naval y la aviación.

Varios países ricos en gas y petróleo de Oriente Medio cuentan con el hidrógeno para mantener su posición como principales proveedores de energía del mundo. Los reinos del desierto del golfo Pérsico (Arabia Saudí, EAU y Kuwait) poseen un amplio potencial solar, espacio de almacenamiento subterráneo y experiencia en el comercio de moléculas de energía. Podrían desarrollar una infraestructura de redes y transporte naval, incluidos puertos, para posicionarse como grandes exportadores de hidrógeno. Desde luego, sus ambiciones podrían verse limitadas por la falta de agua dulce suficiente. Una solución para ello podrían ser las plantas desalinizadoras que, por supuesto consumirían una buena parte de la electricidad solar o el gas natural utilizados, para producir el hidrógeno verde o azul, respectivamente.

No todos los petroestados tienen el potencial en energías renovables para convertirse en grandes exportadores de hidrógeno limpio, o simplemente carecen del interés. La compañía estatal rusa Gazprom, por ejemplo, muestra interés por mantener sus actuales exportaciones de gas natural y defiende la opinión de que su gas debería convertirse en hidrógeno (azul) solo en el punto de consumo, por ejemplo, al desembarcar en las costas de Alemania. Si bien existen argumentos técnicos que apoyan la postura de Gazprom, es evidente que resulta la forma más sen-

cilla de que la gran corporación estatal rusa conserve su modelo de negocio actual¹⁰³.

Nuevas interdependencias

Si el hidrógeno se convierte en una materia prima comercializada a nivel mundial, podría dar lugar a nuevas relaciones comerciales e interdependencias. Al igual que en los comienzos del mercado del GNL, están cerrándose contratos y acuerdos bilaterales en torno al comercio del hidrógeno, como Japón-Australia, Alemania-Marruecos, Noruega-Corea, Bélgica-Omán, Países Bajos-Portugal, etc. Con el tiempo, estos acuerdos bilaterales podrían dar lugar a nuevas relaciones en el comercio de energía, nuevas líneas marítimas y nuevas rutas comerciales. Esto ya influye en las políticas exteriores de todo el mundo y también podría informar la planificación estratégica de los especialistas en defensa.

El auge del hidrógeno ya está produciendo un nuevo enfoque en la «diplomacia energética», definida tradicionalmente como «actividades exteriores relacionadas con el gobierno con el objetivo de garantizar la seguridad energética de un país, además de promover oportunidades de negocio relacionadas con el sector energético»¹⁰⁴. La diplomacia energética de la mayoría de los países está orientada a obtener importaciones fiables y asequibles de combustibles fósiles. En la actualidad, los diplomáticos y funcionarios de algunas delegaciones exteriores también dedican tiempo a explorar futuras importaciones seguras, tanto de hidrógeno como de gases y líquidos derivados del hidrógeno. El gobierno holandés ha nombrado incluso a un «enviado especial del hidrógeno» con este objetivo, el Sr. Noé Van Hulst.

Los diplomáticos y representantes industriales japoneses están negociando con Australia, Brunéi, Noruega y Arabia Saudí el abastecimiento de combustible de hidrógeno. Alemania ha firmado un acuerdo de cooperación con Marruecos para producir metanol a partir del hidrógeno, Corea del Sur se ha interesado en Noruega, los Países Bajos se centran en Portugal como potencial proveedor de hidrógeno y los agentes industriales de Bélgica

¹⁰³ WESTPHAL, Kirsten; DRÖGE, Susanne; and GEDEN, Oliver: «The international dimensions of Germany's hydrogen policy» SWP. Berlín. Junio de 2020. Disponible en: https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/comments/2020C32_HydrogenPolicy.pdf. Consulta el 12 de enero de 2021.

¹⁰⁴ GRIFFITHS, Steven. «Energy diplomacy in a time of energy transition» *Energy Strategy Reviews* 26 (2019): 100386.

piensan en Omán y Chile para sus importaciones de hidrógeno a gran escala. Si Europa comienza a importar hidrógeno de países como Marruecos y Omán, aumentará la importancia estratégica de estos países para la UE.

Si la tendencia actual hacia los acuerdos bilaterales continúa, el mercado podría comenzar desde una base muy fragmentada, emulando la experiencia durante las primeras fases del mercado de GNL. Los primeros proyectos de GNL estaban sujetos a contratos inflexibles, bilaterales y a largo plazo, con precios indexados al petróleo, por lo que en ocasiones se denominaban «oleoductos flotantes». Japón encabezó el desarrollo del mercado de GNL al surgir como primer gran comprador. Su compromiso con las importaciones de hidrógeno a gran escala podrían convertirla una vez más en pionera del mercado gasístico mundial, esta vez con el hidrógeno.

Una de las principales diferencias en relación con el comercio de crudo o gas natural es que el comercio del hidrógeno será menos asimétrico. Es técnicamente posible producir hidrógeno en prácticamente cualquier lugar del mundo. El hecho de que muchos países podrían convertirse en «prosumidores» (tanto productores como consumidores de hidrógeno) y que el hidrógeno puede almacenarse, hace que a los exportadores les resulte casi imposible usar el comercio de hidrógeno como un arma o que los importadores se vean atrapados por un pequeño cartel de proveedores. No obstante, el comercio de hidrógeno no será tan recíproco como el comercio transfronterizo de electricidad, donde los electrones viajan en ambas direcciones en función de las condiciones de oferta y demanda a ambos lados de la frontera. Además, el comercio internacional de hidrógeno reforzará la seguridad energética de los importadores al ofrecer un respaldo para el sistema de electricidad. Para los países dependientes de la importación de energía, también podría aumentar la diversidad de las fuentes de energía y mejorar la seguridad energética. Como el hidrógeno puede almacenarse, los países podrían considerar la creación de reservas estratégicas de hidrógeno para protegerse contra cualquier trastorno imprevisto del suministro, de manera similar al programa multilateral de reservas de petróleo supervisado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE).

Al mismo tiempo, la perspectiva de importaciones de hidrógeno a gran escala podría crear también nuevas preocupaciones para la seguridad marítima. El hidrógeno es un material muy inflamable y explosivo. Algunos de sus derivados, como el amoníaco, son

tóxicos. Los riesgos y amenazas de un vertido producido por un buque petrolero o de GNL son bien conocidos. Los vertidos de GNL suponen una amenaza de asfixia y quemaduras criogénicas. Algunos estudios han señalado que el riesgo de explosión de los buques cargueros de GNL es bastante bajo, lo que reduce el riesgo de que se conviertan en objetivos terroristas¹⁰⁵. Los buques petroleros han sufrido ataques con torpedos y estos incidentes han demostrado que, al igual que los cargueros de GNL, no son «bombas flotantes». Por supuesto, pueden incendiarse, pero no causan explosiones masivas. Esto podría ser diferente para los buques que transporten hidrógeno líquido, donde la elevada velocidad de llama del hidrógeno produce un riesgo de detonación y una onda expansiva¹⁰⁶. La expansión de este comercio a lo largo de rutas de suministro fijas podría, así, crear nuevos riesgos para la seguridad marítima, incluidos los estrechos y las ciudades portuarias. La devastación provocada por un buque que transportaba nitrato de amoníaco fondeado en el puerto de Beirut que explotó en agosto de 2020 es un recordatorio de los graves riesgos de seguridad que implican las sustancias muy inflamables, como el hidrógeno y el amoníaco.

A medida que cambian los flujos comerciales de la energía, cambiarán también las alianzas de seguridad. Solo hay que ver el impacto de la revolución del petróleo de esquisto sobre la relación de Estados Unidos con el golfo Pérsico. Estados Unidos se desentiende cada vez más de Oriente Medio. Esto es un presagio de lo que vendrá. A medida que avanza la transición energética, las vías principales para el comercio del petróleo, como el estrecho de Hormuz, serán menos importantes para la seguridad energética mundial. También se producirá un debilitamiento de las alianzas basadas en los combustibles fósiles. La OPEC como organización prácticamente ha dejado de existir: las decisiones clave se toman ahora en otro lugar. Ya existen intensos conflictos entre los productores de petróleo por la cuota de mercado¹⁰⁷. Esto solo se intensificará si disminuye la demanda de

¹⁰⁵ US GAO, «Maritime security: public safety consequences of a terrorist attack on a tanker carrying liquefied natural gas need clarification: report to Congressional requesters». Febrero de 2007. Disponible en: <https://www.gao.gov/new.items/d07316.pdf>. Consulta el 15 de enero 2021.

¹⁰⁶ Lloyd's Register, «World first for liquid hydrogen transportation». 23 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www.lr.org/en/insights/articles/world-first-for-liquid-hydrogen-transportation/>. Consulta el 15 de enero de 2021.

¹⁰⁷ VAN DE GRAAF, Thijs: «Battling for a shrinking market: oil producers, the renewables revolution, and the risk of stranded assets». En *The geopolitics of renewables*, págs. 97-121. Springer, Cham, 2018.

gas y petróleo debido a su sustitución por las renovables y el hidrógeno verde.

Bloqueo de carbono (*carbon lock-in*) y activos varados

Incluso si los ambiciosos planes del hidrógeno se desarrollan debido a un auténtico compromiso por alcanzar los objetivos de cero emisiones netas a mediados de siglo, existen riesgos evidentes de que los países y las empresas desplieguen planes que busquen perdurar el uso incesante de los combustibles fósiles, un fenómeno denominado «bloqueo del carbono, *carbon lock-in*». Por ejemplo, los planes de Alemania para importar grandes cantidades de hidrógeno verde desde países norteafricanos podrían provocar una situación donde la electricidad solar y eólica se exporten mientras que los combustibles fósiles alimenten el suministro de electricidad local¹⁰⁸. Así, es necesario atender primero la demanda de electricidad renovable en los países de origen antes de que las exportaciones de hidrógeno puedan ser realmente «verdes».

También existen otros riesgos derivados de invertir miles de millones de dólares para ampliar las cadenas de valor para el hidrógeno azul. A menudo se aduce que el hidrógeno azul es necesario como un puente hacia el hidrógeno verde, de forma similar al argumento del gas natural como «combustible puente». Los responsables políticos en Alemania, la Comisión Europea y otros lugares parecen compartir la idea de que, al final, el hidrógeno verde debería dominar el suministro, ya que el hidrógeno azul no es neutro en carbono.

No obstante, los hidrógenos azul y verde tienen cadenas de valor completamente distintas. Son como mundos paralelos. El mundo del hidrógeno azul está habitado por compañías de gas y petróleo que ven la CAC como una forma de producir hidrógeno bajo en carbono. La CAC podría incluso convertirse en una nueva fuente de ingresos para los yacimientos de gas y petróleo agotados, como los del mar del Norte. El hidrógeno verde pertenece más al terreno de las compañías eléctricas, los operadores de red y las empresas fabricantes de electrolizadores. La producción

¹⁰⁸ WESTPHAL, Kirsten; DRÖGE, Susanne; and GEDEN, Oliver: «The international dimensions of Germany's hydrogen policy». SWP, Berlín. Junio de 2020. Disponible en: https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/comments/2020C32_HydrogenPolicy.pdf. Consulta el 12 de enero de 2021.

de hidrógeno mediante electrolizadores puede mejorar el caso de negocio de las renovables y ayudar a equilibrar la red. Estos dos modelos industriales, azul y verde, se dirigen hacia una colisión frontal.

La estrategia «primero azul, después verde» para el hidrógeno es arriesgada, ya que podría iniciar un ciclo autosostenido de «*socio-technical lock-in*». No es raro que las instalaciones de producción de hidrógeno azul tengan ciclos de vida económica de 25 años o más. Podría producirse el varado de activos si el mercado del hidrógeno azul desaparece antes de este plazo, por ejemplo, si los costes del hidrógeno verde se reducen más rápido de lo esperado y se bloquean. Las inversiones en hidrógeno azul también podrían motivar el desarrollo de una infraestructura de transporte de hidrógeno muy costosa, que no resultaría apropiada para el cambio al hidrógeno verde, ya que los hidrógenos azul y verde se producirán en ubicaciones geográficas muy diferentes. Cualquier ampliación de la producción de hidrógeno azul suscitará intereses establecidos y nuevos participantes, que probablemente se resistirán al cambio hacia el hidrógeno verde.

Modelar y gobernar el mercado

También podrían surgir tensiones geopolíticas relacionadas con las regulaciones y la gobernanza de los mercados internacionales del hidrógeno. Un aspecto donde podrían aparecer confrontaciones tiene que ver con los estándares técnicos. La Estrategia del Hidrógeno de la UE menciona expresamente el objetivo de «reforzar el liderazgo de la UE en los foros internacionales de estándares técnicos, regulaciones y definiciones sobre el hidrógeno»¹⁰⁹. Estos estándares incluyen normas de seguridad y sostenibilidad para las propias moléculas de hidrógeno, pero también para todo el transporte, manipulación, almacenamiento e infraestructuras de uso relacionadas con el hidrógeno. La definición de normas puede proporcionar una ventaja competitiva a las empresas que ya dominen y controlen las tecnologías estandarizadas. En los últimos años, China se ha mostrado mucho más proactiva en este

¹⁰⁹ European Commission, «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe». Bruselas. 8 de julio de 2020, p. 23.

ámbito, incluido en los principales organismos de definición de estándares, como la Organización Internacional de Estándares¹¹⁰.

Otro elemento que determina el mercado tiene que ver con la certificación del hidrógeno. Una molécula de hidrógeno gris es idéntica a una molécula de hidrógeno verde. Por lo tanto, se necesita un sistema de certificación que permita a los usuarios finales conocer el contenido en carbono y la calidad del hidrógeno. Los marcos que permiten también verificar el origen del hidrógeno suelen denominarse «garantías de origen»¹¹¹. En la actualidad, no existe una definición del hidrógeno verde aceptada universalmente, a pesar de que el comercio internacional del hidrógeno se beneficiaría de un sistema de garantías de origen armonizado¹¹². El contenido en carbono del hidrógeno se convertirá en la «nueva moneda», en palabras de Jorgo Chatzimakakis de Hydrogen Europe, una asociación comercial europea para la industria del hidrógeno¹¹³.

Estos aspectos podrían producir fricciones comerciales. Es probable que, con el tiempo, los principales importadores, como la UE, definan restricciones que solo permitan importar hidrógeno obtenido de energías renovables (verde) sin las penalizaciones aplicadas al carbono¹¹⁴. El hidrógeno podría convertirse en uno de los mayores campos de batalla para la futura guerra del comercio de carbono. Ya estamos empezando a ver las primeras manifestaciones de este hecho. En octubre de 2020, el gobierno francés presionó a Engie, una compañía eléctrica, a retirarse de un acuerdo de 7000 millones de dólares para suministrar GNL desde yacimientos de petróleo no convencional en Texas. Al parecer, París hizo esto debido a la preocupación de que el

¹¹⁰ SEAMAN, John: «China and the New Geopolitics of Technical Standardization». IFRI. Enero de 2020. Disponible en: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/seaman_china_standardization_2020.pdf. Consulta el 15 de enero de 2021.

¹¹¹ International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen: A Guide To Policy-Making.» Abu Dabi: IRENA. Noviembre de 2020, p. 9.

¹¹² ABAD, Anthony Velazquez, and DODDS, Paul E.: «Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges». *Energy Policy* 138 (2020): 111300.

¹¹³ Cited in: VAN RENNSSEN, Sonja: «From blue to green: hydrogen's own energy transition». *Energy Monitor*, 14 de agosto de 2020. Consulta el 15 de enero de 2021.

¹¹⁴ MICHAELOWA, Axel and BUTZENGEIGER, Sonja: «Breakthrough of Hydrogen Technologies until 2030: Chances and Risks for Gulf Countries, International Policy Implications», en EDA Insights. Septiembre de 2019. Disponible en: https://eda.ac.ae/docs/default-source/Publications/eda-insight_hydrogen-economy_en_final.pdf?sfvrsn=2. Consulta el 15 de enero de 2021.

GNL resultara demasiado contaminante debido a las emisiones indirectas (fugas) de metano¹¹⁵. A medida que la UE y otros agentes avanzan hacia la adopción de mecanismos de ajuste del carbono en frontera para abordar el problema de las «fugas de carbono» (deslocalización de industrias intensivas en energía a jurisdicciones con unas regulaciones más laxas en materia de emisiones), los exportadores de hidrógeno azul podrían quedar en desventaja en comparación con los exportadores de hidrógeno verde.

También existirá competencia geoeconómica sobre las divisas de referencia en el comercio del hidrógeno. El comercio actual del petróleo está denominado predominantemente en dólares estadounidenses, lo que proporciona a Estados Unidos ventajas estratégicas para ejercer su influencia sobre otros países. Por ejemplo, las actuales sanciones de Estados Unidos contra las exportaciones de petróleo iraníes se basan realmente en la hegemonía monetaria y financiera de Estados Unidos. Washington amenaza con denegar a los posibles compradores del petróleo iraní el acceso a los mercados financieros y el sistema bancario estadounidenses¹¹⁶. La India ha intentado sortear el programa de sanciones realizando un comercio de trueque con Irán, mientras que Europa ha intentado establecer un mecanismo de pago alternativo, INSTEX, si bien con escasos resultados. La UE ahora prefiere evitar tales complicaciones en el futuro. Su estrategia del hidrógeno menciona el objetivo explícito de desarrollar una referencia para un comercio del hidrógeno denominado en euros¹¹⁷. Esto significaría que, en esta época de «interdependencia arrojadiza», Estados Unidos podría ejercer menos influencia sobre las importaciones de hidrógeno de Europa que sobre las importaciones de petróleo de Europa.

Conclusiones

Sin duda, el hidrógeno claramente tiene la posibilidad de convertirse en un componente fundamental para un mundo libre de carbono. A medida que la escala de los proyectos de hidrógeno

¹¹⁵ LEFEBVRE, Ben: «French Government Blocks LNG Deal as too Dirty». *Politico*, 21 de octubre de 2020.

¹¹⁶ VAN DE GRAAF, Th. (2013). The 'oil weapon' reversed? Sanctions against Iran and US-EU structural power. *Middle East Policy*, 20(3), 145-163.

¹¹⁷ European Commission, «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe». Bruselas. 8 de julio de 2020, p. 21.

verde crece desde los megavatios hasta los gigavatios¹¹⁸, está claro que el impulso político y empresarial alcanza niveles nuevos, y que el hidrógeno podría finalmente cumplir su promesa como portador de energía limpia.

Sin embargo, existen importantes discrepancias en relación con la infraestructura subyacente y las cadenas de valor de una futura economía basada en el hidrógeno (véase la Tabla 4). En cuanto a la producción, existen diferencias entre los partidarios del hidrógeno azul y verde. Es evidente que este último sería la forma de innovación más disruptiva, pero el anterior sigue teniendo ventajas en términos de estructura de costes y compatibilidad con la infraestructura existente. En cuanto al consumo, algunos agentes desean utilizar el hidrógeno en todos los ámbitos, desde automóviles y trenes hasta la calefacción doméstica y la industria, lo que llevaría a una sociedad completamente basada en el hidrógeno, como en la que Japón y Corea aspiran a convertirse. Otros, por el contrario, consideran que el hidrógeno es un simple portador de energía que debería utilizarse solo en algunos nichos, restringidos a algunas escasas áreas que no pueden electrificarse directamente. El hidrógeno, en esta última opinión, a menudo se compara con el champán, una cara bebida de lujo reservada solo para ocasiones especiales y que no mezclarías con agua (en referencia a la mezcla del hidrógeno en las redes de gas natural actuales).

	Hidrógeno azul	Hidrógeno verde
Uso extendido	«Sociedad basada en el hidrógeno»	
Uso limitado		«El hidrógeno como el champán de los combustibles»

Tabla 4. Distintos puntos de vista sobre el papel del hidrógeno en el futuro.

Aunque el desenlace de esta batalla es todavía incierto, el hidrógeno se convertirá en un elemento destacado en la nueva geoeconomía de la energía en los próximos años y décadas. El combustible libre de carbono podría conllevar una revolución geopolítica para algunos países. La transformación de las energías renovables representa un auténtico golpe de suerte

¹¹⁸ COLLINS, Leigh: «Gigawatt-scale: the world's 13 largest green-hydrogen projects». *Recharge*, 21 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://www.rechargenews.com/transition/gigawatt-scale-the-worlds-13-largest-green-hydrogen-projects/2-1-933755>. Consulta el 13 de enero de 2021.

para países como Chile y Marruecos, que carecen de combustibles fósiles y se ven obligados a importar una gran parte de su suministro energético. Si tienen éxito al convertirse en grandes exportadores de hidrógeno verde, su importancia geoestratégica podría aumentar, así como la de otros países con gran potencial en cuanto a energías renovables, como Australia. Sin embargo, es poco probable que alcancen el mismo peso geopolítico que el actual grupo de petroestados ha tenido en las últimas décadas. Dado que el hidrógeno es principalmente un negocio de conversión en lugar de un negocio de extracción, las rentas derivadas de la exportación del hidrógeno probablemente sean menores que las obtenidas con los combustibles fósiles. Y como el hidrógeno puede producirse en prácticamente cualquier lugar del mundo, los exportadores de hidrógeno no tendrán la misma influencia en la política exterior que tienen, por ejemplo, Rusia o Arabia Saudí, gracias a sus exportaciones de gas y petróleo.

En definitiva, es poco probable que el hidrógeno se convierta en el nuevo petróleo, como mantiene la opinión popular. Es poco probable que alcance la cuota de mercado del petróleo en el *mix* de energía mundial (actualmente más del 30 % de la energía primaria), ni mucho menos igualar la liquidez y la importancia geoestratégica del petróleo. Dado que el hidrógeno es un negocio de conversión en lugar de extracción, las rentas probablemente serán menores que las obtenidas con el petróleo, y probablemente estarán mucho más repartidas entre un mayor número de productores. El hidrógeno guarda mayores similitudes con el gas natural, y con el GNL en particular, y es más probable que dé lugar a mercados regionales, en especial a medio plazo.

Dicho esto, los intereses geopolíticos en torno al hidrógeno son enormes. Incluso como materia prima comercializada a nivel regional, el hidrógeno es una de las tecnologías que pueden impulsar un cambio del escenario geopolítico en el siglo XXI, junto con otras tecnologías como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, los vehículos eléctricos, las redes inteligentes, etc. Los países y las empresas están maniobrando para controlar lo que parece destinado a convertirse en un mercado de materias primas internacional por valor de muchos millones de dólares. El tamaño y alcance de este mercado son todavía inciertos, pero está claro que está librándose la carrera del hidrógeno limpio y que tiene profundas implicaciones e incentivos geopolíticos.

