



Hidrógeno Verde

Avanzando sobre la matriz energética del Uruguay

Premio Academia Nacional de Economía 2023

Octavio Berruti Nunes

Agradecimientos

Un agradecimiento a **Carlos Mazal, Pablo Cristo, Jorge Ferreiro, María Camacho, Juan Gibert**, quienes con su opinión y aportes contribuyeron a este trabajo.

Además un agradecimiento a mi familia, quien día a día me motiva a superarme y tener crecimiento personal y profesional.

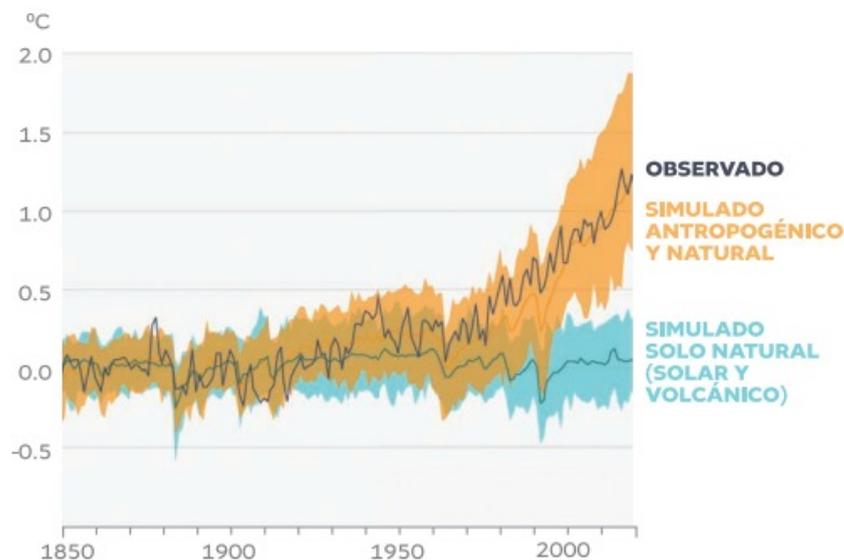
Agradecimientos	2
Introducción	4
Hidrógeno Verde	6
¿Cómo se inserta Uruguay al Hidrógeno verde?	7
Electrólisis del agua	12
Diferentes tipos de hidrógeno	14
Utilización del hidrógeno verde	15
Hidrógeno verde como ventana oportunidad de inversión	18
Puntos claves para invertir en energías renovables en Uruguay	20
Actualidad del componente	22
Demanda externa de hidrógeno verde	24
Ventajas competitivas de Uruguay como productor de H ₂ verde	27
Hilo de proposiciones en base a Hidrógeno verde	29
Descarbonización del transporte	29
Transporte a partir de H ₂ :	30
Descarbonización del transporte mediante vehículos de celdas de combustible	33
Elaborar una “Estrategia Nacional de movilidad sustentable: Uruguay”	36
Metanol verde como combustible sustituto.	41
Amoníaco verde: Una solución a los fertilizantes.	46
Ruta estratégica:	49
Políticas	49
Iniciativas estratégicas	51
Ruta de propuestas	54
Conclusión	57
Referencias	58

Introducción

El aumento de la temperatura global es causado por el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera de la Tierra. En la actualidad, se estima que el 73% de las emisiones de GEI están relacionadas con el consumo de energía (Ritchie, Roser y Rosado, 2020), principalmente debido a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Además, aproximadamente el 80% del suministro de energía primaria a nivel mundial proviene de fuentes de combustibles fósiles (REN21, 2022, p.37).

El desarrollo económico está estrechamente relacionado con el uso de energía. Por lo tanto, para seguir promoviendo un desarrollo social inclusivo, es necesario llevar a cabo una transformación amplia y rápida en la forma de generación y utilización de la energía. En este contexto, el hidrógeno verde se presenta como una alternativa importante para lograr la descarbonización, especialmente en aquellos sectores donde reducir las emisiones es más difícil de lograr.

Cambios de temperatura global en la superficie terrestre



Fuente: IPCC 2022, p16

Los efectos actuales y previstos en el cambio climático, medio ambiente y en las costumbres de las personas, especialmente en las economías más vulnerables, lo convierten en uno de los desafíos más importantes y urgentes del siglo XXI.

El último informe de evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) establece de manera inequívoca que este proceso es causado por la actividad humana. Según el informe, la temperatura promedio en la superficie de la Tierra ha aumentado aproximadamente 1°C desde el siglo XIX, y esta tendencia se está acelerando (IPCC, 2021, p.5).

El Acuerdo de París, que fue firmado en 2015 durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y ratificado por casi todos los países del mundo, establece el compromiso de limitar el aumento de la temperatura promedio global muy por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales (CMNUCC - Acuerdo de París, 2015, art.2).

En el marco de este acuerdo, los países deben establecer compromisos vinculantes para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), conocidos como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés). Estos compromisos se informan cada 5 años y deben ser más ambiciosos. Actualmente, más de 70 países, incluidos algunos de los mayores emisores (ONU, 2022), se han comprometido a alcanzar la neutralidad de emisiones de GEI para 2050.

El hidrógeno verde (H₂) surge como una de las opciones más relevantes para lograr la descarbonización, especialmente en sectores con altas emisiones difíciles de reducir. Este tipo de hidrógeno se produce mediante la electrólisis del agua, utilizando fuentes de energía renovable.

Se espera que en los próximos años haya una acelerada demanda mundial de hidrógeno verde. El avance tecnológico y la implementación de políticas encaminadas a la descarbonización, en línea con el Acuerdo de París, serán los impulsores que determinarán la evolución del mercado del hidrógeno verde y crearán oportunidades para aquellos países capaces de abastecer esta demanda de manera competitiva.

Uruguay se perfila como un país con un gran potencial en la economía del hidrógeno verde debido a la calidad de sus recursos naturales, las características de su matriz energética, los avances logrados en la transición de su matriz eléctrica, el desarrollo logístico y la confiabilidad que ofrece como destino de inversiones.

Hidrógeno Verde

El hidrógeno (H_2) es el elemento más abundante en el universo y tiene una alta capacidad calorífica en relación con su masa. Su combustión no contribuye al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Además, el hidrógeno es altamente versátil y se puede aplicar en una amplia gama de usos energéticos e industriales. Existe un mercado industrial bien establecido con una vasta experiencia en el manejo de este elemento.

Sin embargo, en su forma natural, el hidrógeno generalmente se encuentra asociado a otras moléculas, como el agua (H_2O) o compuestos de carbono. Por lo tanto, es necesario separar el hidrógeno para obtenerlo de manera pura.

El hidrógeno ocupa el primer lugar en la tabla periódica de elementos. Es el elemento más ligero y su átomo está compuesto por un protón y un electrón. En forma de molécula diatómica (H_2), el hidrógeno es estable.

En la actualidad, el 99% del hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural y carbón, lo que genera emisiones de gases de efecto invernadero.

Cada año se producen más de 120 millones de toneladas de hidrógeno, de las cuales aproximadamente dos tercios son de hidrógeno puro y un tercio son mezclas con otros gases. La demanda se centra en su uso en refinerías, la producción de amoníaco (para obtener fertilizantes y otros productos) y, de manera indirecta, en la producción de metanol, acero y otros materiales.

El hidrógeno verde se produce sin utilizar combustibles fósiles. Su producción se realiza exclusivamente a partir de fuentes de energía renovable. Actualmente, el método con mayor potencial para la producción de hidrógeno verde es la electrólisis del agua (H_2O). Mediante este proceso, utilizando energía eléctrica proveniente de fuentes renovables y agua, se obtienen hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) por separado. Por lo tanto, la producción de hidrógeno verde no genera emisiones de gases de efecto invernadero.

El uso del hidrógeno verde es completamente sostenible, ya que se produce a partir de fuentes renovables. Además, después de utilizar el hidrógeno, el subproducto resultante es vapor de agua, lo que significa que la misma cantidad de agua regresa al ambiente, cerrando así el ciclo.

¿Cómo se inserta Uruguay al Hidrógeno verde?

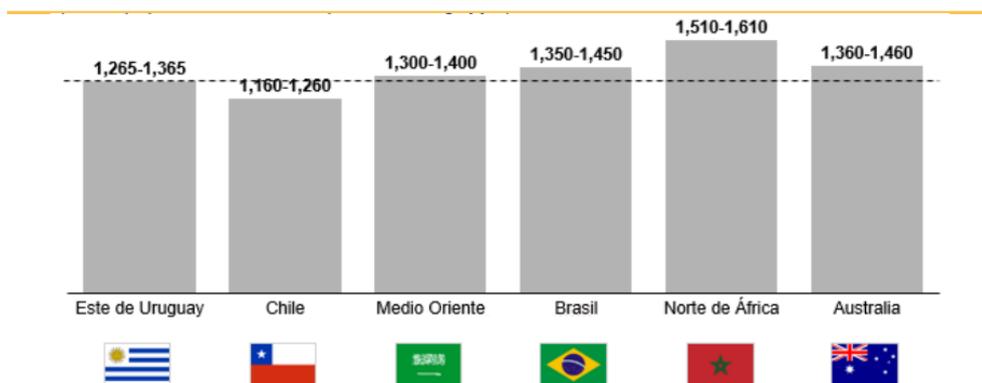
Posteriormente del exitoso recorrido en la transformación de la matriz energética en Uruguay, en vistas de fuentes renovables, se logra visualizar al país como potencial exportador de hidrógeno verde y sus derivados.

Se denotan puntos claves en los cuales se apoya en lo antes mencionado.

1. Recursos en óptimos niveles de disponibilidad de agua, CO₂/Biomasa.

Uruguay posee niveles de biomasa e industrias diseñadas donde puede obtener el componente CO₂ de origen renovable, esto es crucial en la producción de Synfuels¹ y sus derivados. En el momento que se obtiene energía eléctrica desde una fuente renovable y biomasa se logran obtener costos a niveles competitivos en productos que requieren H₂ y CO₂ biogénico, como lo son el metanol y jet fuels

COSTO PROD. DE JET FUEL VS COMPETIDORES.
(US\$/TON DE COMBUSTIBLE POR INYECCIÓN; AÑO 2030).



Fuente: Extraído de Uruguay XXI - Energías renovables 2022.

Uruguay además dispone de niveles abundantes de agua en el territorio nacional, con cifras promedio de participación de 1.310 mm por año.²

2. Elementos de matriz eléctrica renovable

Cuando nos referimos a procesos industriales que requieren operaciones ininterrumpidas, como el proceso de Fischer-Tropsch, es crucial reconocer que la interconexión eléctrica desempeña un papel de importancia significativa en la rentabilidad de las inversiones necesarias para la producción de hidrógeno verde y sus productos asociados, a través de la utilización de instalaciones eólicas y

¹ combustible sintético

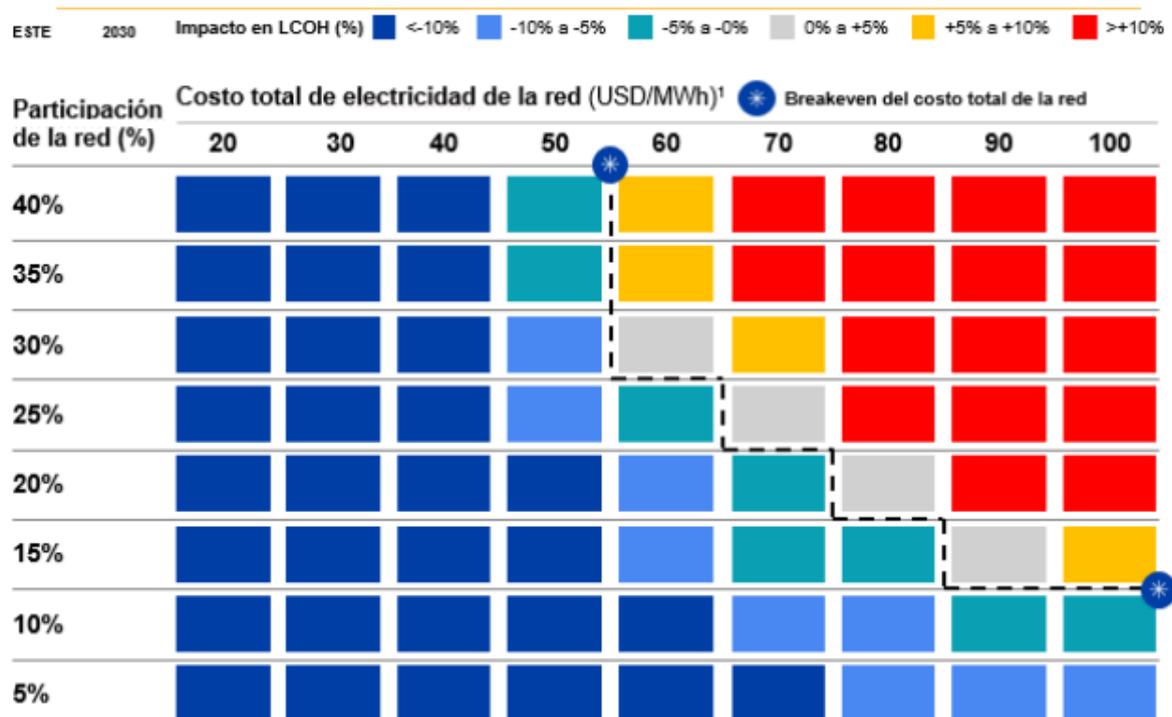
² Según el Banco nacional de datos hidrometría sistema de información hídrica, Dinagua 2019.

paneles solares fotovoltaicos, respaldados por sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

El gráfico adjunto visualiza de qué manera incide el costo del hidrógeno (H₂) en la manufactura de combustibles de aviación, considerando la contribución de la energía eléctrica procedente de la red.

Para ilustrar este concepto, supongamos que el costo de la energía eléctrica de la red se sitúa en 50 U\$S por megavatio-hora (MWh) y que la aportación de la red eléctrica representa el 30% del consumo total de energía necesario para la producción de H₂. En esta coyuntura, el costo se reduce en una proporción que oscila entre el 5% y el 10%, en contraposición a una inversión basada exclusivamente en fuentes de energía eólica y solar fotovoltaica.

JET FUEL SYN FUEL: EL CASO DE NEGOCIOS PARA JET
FUEL SYN FUEL ES MÁS POSITIVO DADOS LOS REQUISITOS DE
ESTABILIDAD DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.



1. Incluidos los costes de energía, conexión y transporte. No incluye restricción vendida a la red
Fuente: McKinsey & Company de acuerdo con contrato #: C-RG-T3777-P001 concluido con el IADB

Fuente: Extraído de Uruguay XXI - Energías renovables 2022.

La considerable incorporación de fuentes de energía renovable en la matriz eléctrica de Uruguay sitúa al país como un actor fundamental a nivel global en el ámbito de la transición energética. Según el informe "WEF - Fostering Effective Energy Transition, edición 2021", Uruguay se ubica en la posición número 13 en el ranking

de Transición Energética, destacándose como el líder indiscutible en la región en este aspecto.

3. Institucionalidad, ámbito legal y estabilidad política.

Uruguay se distingue por su arraigada democracia, lo que refleja una sobresaliente estabilidad sociopolítica y le confiere el prestigioso sexto puesto a nivel mundial en términos de las libertades civiles y políticas garantizadas a su población.

Además, lidera en su región en lo que respecta a la percepción de baja corrupción y el índice de estado de derecho. El país ha alcanzado logros notorios en la digitalización de su sector público, consolidándose en la posición 26 a nivel mundial en el ranking de desarrollo de gobierno electrónico, destacándose como pionero en su región en este ámbito. No menos relevante es su robusta calificación crediticia.

Uruguay ha implementado medidas estratégicas para impulsar el desarrollo de fuentes de energía renovable y ha establecido marcos regulatorios sólidos al respecto. Con una estabilidad política y macroeconómica, proporciona el contexto propicio para la ejecución de proyectos de hidrógeno a gran escala, lo cual incentiva el interés del sector privado y contribuye a la disminución de los costos de capital asociados a tales iniciativas.

4. Aspectos logísticos.

Uruguay se aprovecha de su acceso al océano Atlántico, lo que facilita la exportación de hidrógeno y sus derivados a Europa y Estados Unidos con distancias de envío más cortas. Esto conlleva a una reducción en los costos de transporte.

Además, el país no presenta obstáculos geográficos significativos y posee una infraestructura local bien desarrollada para el transporte y la distribución de hidrógeno y sus derivados. El sistema de transporte incluye un ferrocarril de carga que llega al puerto de Montevideo, así como opciones de transporte fluvial y terrestre, lo que contribuye a aumentar la competitividad en la transferencia de productos destinados a la exportación.

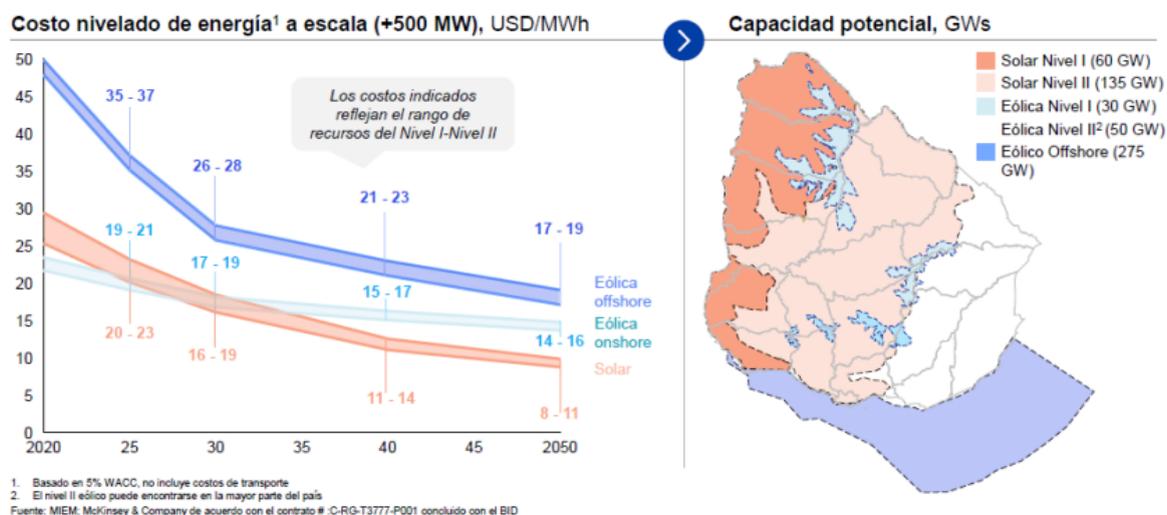
Aprovechando estas ventajas, expertos del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), en colaboración con especialistas del puerto de Róterdam y con el respaldo de UTE y ANCAP, llevaron a cabo un estudio de pre-factibilidad en 2023 sobre la producción de hidrógeno verde en Uruguay. Este estudio abarca todos los aspectos de la cadena de producción, desde la generación hasta la exportación. Se analizaron los costos asociados con la producción, el almacenamiento y el transporte del hidrógeno, considerando diversas alternativas de transporte. Los

resultados de esta investigación señalan que es factible alcanzar costos cercanos a los U\$S 2,3 por kilogramo, lo que representa un precio competitivo a nivel global.

5. Ventajas en generación de energías renovables y sus derivados.

Uruguay se vislumbra por su riqueza en recursos energéticos provenientes de fuentes eólicas y solares, con costos que se asemejan a los de la electricidad convencional, lo que le confiere un nivel de competitividad sobresaliente en este ámbito. La generación de energía a partir de fuentes solares y eólicas puede ser desplegada en todo el territorio nacional gracias a la baja densidad poblacional, que se sitúa en aproximadamente 20 habitantes por kilómetro cuadrado. Considerando exclusivamente las zonas con mayor potencial en términos de energía eólica y solar, se vislumbra la posibilidad de instalar más de 90 gigavatios (GW) de capacidad, lo que habilitaría la producción de hidrógeno a una escala significativa.

COSTO NIVELADO DE ENERGÍA A ESCALA Y CAPACIDAD POTENCIAL DE URUGUAY



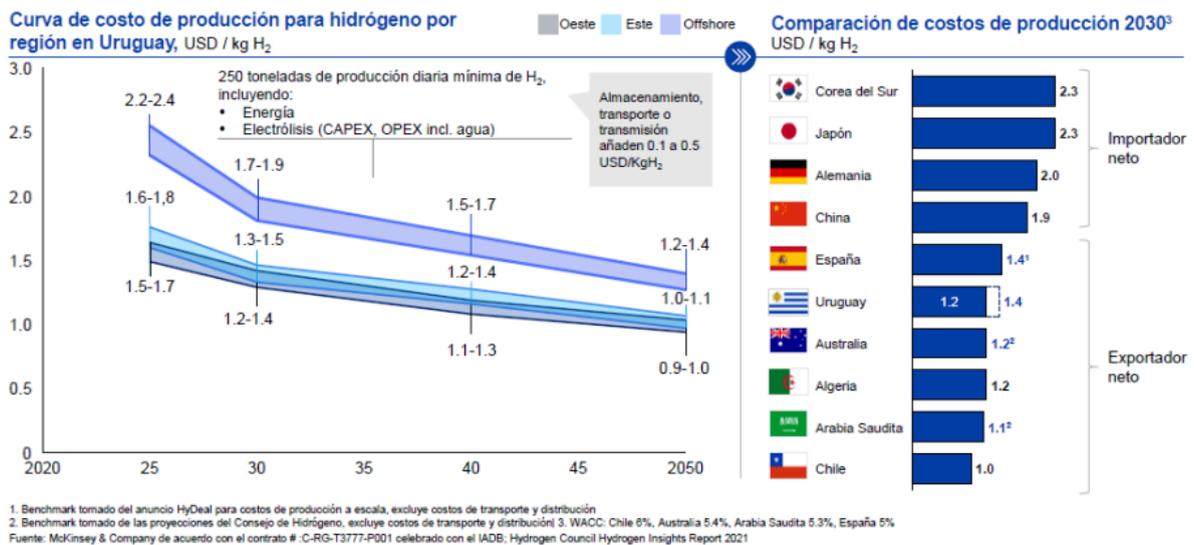
Fuente: Extraído de Uruguay XXI - Energías renovables 2022.

Adicionalmente, Uruguay tiene la capacidad de ampliar su generación de energía renovable en su zona marítima, que abarca una superficie de 208,057 km², mediante la instalación de parques eólicos en el mar. Según datos del Banco Mundial de 2020, se estima un potencial de 190 GW en parques eólicos fijos y 85 GW en parques eólicos flotantes. Las condiciones climáticas en Uruguay posibilitan una complementariedad tanto diaria como estacional entre la energía eólica y solar.

Esto implica que al establecer instalaciones híbridas que combinan la energía eólica y fotovoltaica para la producción de hidrógeno verde, se anticipa que estas plantas

logren altos niveles de capacidad y costos competitivos en la producción de hidrógeno, alcanzando aproximadamente 1,2 U\$S por kilogramo para el año 2030. Esta posición sitúa a Uruguay como uno de los países más competitivos en la exportación de hidrógeno verde y sus derivados.

CURVA DE COSTO DE PRODUCCIÓN PARA HIDRÓGENO Y COMPARACIÓN INTERNACIONAL



Fuente: Extraído de Uruguay XXI - Energías renovables 2022.

Electrólisis del agua

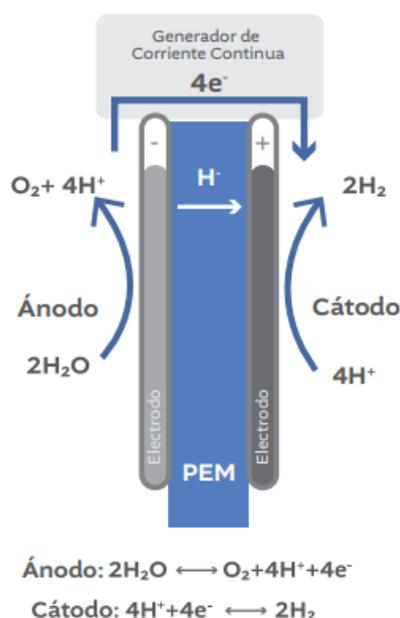
El procedimiento de electrólisis necesita de grandes volúmenes de energía y además una celda que le permite la separación de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno.

En la actualidad, se puede encontrar variadas fuentes tecnológicas dedicadas al proceso de electrólisis, las mismas están basadas en diferentes características y principios, que se proyectan con potencial para ser escaladas. Existen escenarios como los de las tecnologías Alcalina y PEM, que presentan enormes oportunidades de mejora, sin embargo las mismas se encuentran en su fase comercial.

1. La electrólisis por membrana de intercambio de protones (PEM)

La electrólisis mediante membrana de intercambio de protones (PEM) se caracteriza por su mayor eficiencia en comparación con la electrólisis alcalina. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas, generalmente en el rango de 70 a 90 grados Celsius, y demuestra una capacidad eficaz para adaptarse a las variaciones de entrada de energía, lo cual resulta altamente beneficioso cuando se emplea en conjunto con fuentes de energía renovable.

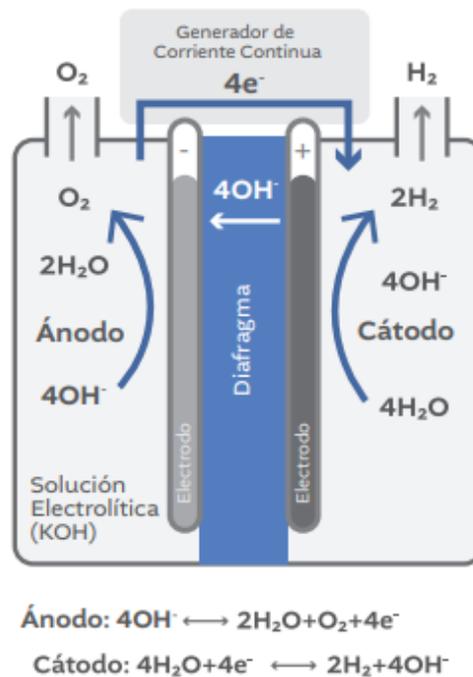
No obstante, es importante destacar que la electrólisis PEM presenta una desventaja significativa, que radica en su necesidad de emplear metales nobles, que son materiales de mayor costo y cuya obtención resulta más compleja en comparación con alternativas menos onerosas.



Fuente: Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay: insumos para la elaboración de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay (Dic 2022).

2. La electrólisis alcalina

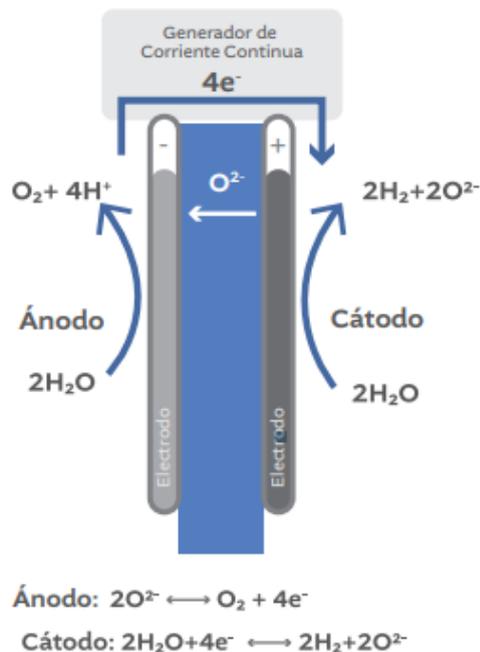
Actualmente, se destaca como la tecnología más avanzada y ampliamente comercializada en el campo. Al igual que la electrólisis mediante membrana de intercambio de protones (PEM), opera a temperaturas similares, lo que la convierte en un proceso extremadamente confiable. Sin embargo, es importante notar que, en términos de eficiencia, no se sitúa en la posición de liderazgo.



Fuente: Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay: insumos para la elaboración de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay (Dec 2022).

3. La electrólisis con celda de óxido sólido (SOEC)

Este proceso se caracteriza por su mayor eficiencia en comparación con las dos tecnologías previamente mencionadas. No obstante, requiere llevarse a cabo a temperaturas extremadamente elevadas, en el rango de 600 a 850 grados Celsius, lo que lo hace menos adaptable a ciertas fluctuaciones en las condiciones de operación. Además, es importante destacar que los avances tecnológicos en este campo todavía se encuentran en una fase de curva de aprendizaje, lo que sugiere un potencial significativo para mejoras futuras.



Fuente: Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay: insumos para la elaboración de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay (Dic 2022).

Diferentes tipos de hidrógeno:

En la actualidad, el hidrógeno se produce a través de diversos procedimientos y a partir de diversas fuentes de energía. Se emplea una codificación cromática con el fin de simplificar su categorización. No obstante, las decisiones estratégicas deben centrarse en la reducción del impacto relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actuales fuentes de energía.

1. Hidrógeno gris:

Este tipo de hidrógeno se obtiene mediante la utilización de combustibles fósiles, como el hidrógeno producido a partir de metano a través de procesos de reformado con vapor o la gasificación de carbón. La producción de hidrógeno gris se asocia con emisiones sustanciales de dióxido de carbono (CO_2), lo que resulta en que estas tecnologías de hidrógeno no sean apropiadas para alcanzar objetivos de emisiones netas cero.

2. Hidrógeno turquesa:

Esta variedad de hidrógeno aprovecha el gas natural como materia prima sin generar emisiones de dióxido de carbono (CO₂). A través del proceso de pirólisis, el carbono contenido en el metano se transforma en carbono negro sólido. Existe un mercado establecido para el carbono negro, lo que representa una fuente adicional de ingresos. El carbono negro se puede almacenar de manera más conveniente en comparación con el CO₂ en estado gaseoso. En la actualidad, el hidrógeno turquesa aún se encuentra en una fase de desarrollo piloto.

3. Hidrógeno azul:

La producción de hidrógeno azul implica el empleo de hidrocarburos, como el metano, a través de un proceso químico denominado "reformado". Este proceso permite la obtención de hidrógeno por un lado y dióxido de carbono por otro.

El dióxido de carbono resultante puede ser sometido a distintos destinos, como su captura, liberación en la atmósfera o su utilización para diversos fines. Para capturar el CO₂, se utilizan sistemas de captura de carbono basados en tecnología de reformado, aunque estos sistemas presentan una eficiencia del 60-65%, lo que implica que aproximadamente el 30-35% del dióxido de carbono se emite a la atmósfera.

Es importante destacar que, si bien la producción de hidrógeno verde actualmente se considera la más costosa, está cerca de ser competitiva en términos de costos en regiones donde se alinean condiciones propicias. Se prevé que la combinación de la disminución de los costos de las energías renovables, la innovación tecnológica en electrolizadores y un enfoque en políticas orientadas a la descarbonización contribuirá a cerrar esta brecha de costos en el futuro.

Utilización del hidrógeno verde

El hidrógeno verde desempeña un papel esencial como vector energético, ofreciendo la capacidad de ser almacenado y transportado de manera eficiente. El H₂ tiene la versatilidad de sustituir a los combustibles fósiles actualmente empleados en diversos modos de transporte, ya sea terrestre, marítimo o aéreo. Esto se aplica tanto a motores eléctricos impulsados por celdas de combustible como a motores de

combustión, los cuales pueden utilizar una variedad de combustibles, incluyendo hidrógeno, amoníaco, metano, combustibles sintéticos, entre otros.

Actualmente existe una aquiescencia mundial en utilizar al H₂ focalizado en rubros del transporte y maquinaria pesadas, donde existe uso intensivo de energía en camiones, ómnibus, maquinaria agrícola; además se convierte en energía limpia para su utilización en la industria, descarbonizando así la producción de acero (hacia acero verde) y en la elaboración de materias primas como el metanol y amoníaco. A su vez el componente puede ser sustituto del gas natural en el rubro residencial, comercial e industrial en forma de metano sintético.

El hidrógeno verde desempeñará un papel de gran relevancia en el ámbito del comercio de energías renovables, tanto a nivel regional como internacional. Se presenta como una solución altamente transportable, lo que facilita su traslado desde regiones con recursos naturales abundantes y una baja demanda local, hacia aquellas áreas con una mayor demanda energética pero un menor potencial de generación de energía renovable.

Otra aplicación relevante es el almacenamiento a gran escala de hidrógeno verde, que se vislumbra como una estrategia para abordar las necesidades a largo plazo, fortaleciendo la capacidad de gestionar las fluctuaciones en la disponibilidad de recursos renovables.

La utilización final del hidrógeno (H₂) se divide en dos segmentos distintos: productos que emplean directamente el hidrógeno verde y productos derivados que se generan a partir del hidrógeno verde.

En el contexto de aplicaciones directas:

1. Rubro transporte y movilidad

En el ámbito del transporte y la movilidad, el hidrógeno verde se puede emplear en una amplia gama de vehículos, tanto ligeros como de transporte pesado, incluyendo tractores y autobuses. Estos vehículos utilizan sistemas de celdas de combustible (FCEV) como fuente de energía.

Dadas las características inherentes de estas celdas, como la autonomía, el peso, el tiempo de carga, entre otros, se prevé que el uso de hidrógeno con celdas de combustible resultará especialmente productivo y prometedor en el ámbito del transporte pesado y en recorridos de larga distancia.

2. Generación de energía (Almacenamiento)

De manera específica, el hidrógeno puede emplearse como una forma de almacenamiento de energía renovable. Se produce hidrógeno durante períodos en los que no es factible la inyección en la red eléctrica, y posteriormente se utiliza para generar electricidad cuando no se dispone de recursos renovables.

Esta aplicación del hidrógeno permite la captura y el almacenamiento de excedentes de energía renovable para su uso futuro, ofreciendo una solución a la variabilidad inherente de las fuentes de energía renovable. Así, contribuye a una mayor estabilidad y flexibilidad en el suministro eléctrico.

3. Redes de gas natural:

El gas natural, que principalmente consiste en metano (CH_4), puede ser combinado con hidrógeno (H_2) dentro de las redes de transporte y distribución de gas. La cantidad máxima de mezcla admisible dependerá de diversos factores, incluyendo los materiales utilizados en las tuberías, la capacidad de los compresores y los dispositivos empleados para el consumo final.

Se estima que es viable mezclar hasta un 20% de hidrógeno en volumen (equivalente al 7% en términos de energía) en el gas natural sin generar un impacto significativo en los equipos destinados a su uso final.

Esta incorporación de hidrógeno en el gas natural posibilita una transición gradual hacia un sistema energético más sostenible y reduce las emisiones de carbono, sin necesidad de llevar a cabo una renovación completa de la infraestructura existente.

4. Industrialización:

En la actualidad, el hidrógeno desempeña un rol de relevancia significativa en la industria, siendo su uso predominante en la refinación de petróleo, específicamente en los procesos de desulfurización destinados a la reducción del contenido de azufre en los combustibles.

Además, el hidrógeno verde ostenta un potencial considerable en el procesamiento del hierro a través de la reducción directa (DRI en inglés), lo que conlleva una contribución sustancial a la descarbonización de este sector.

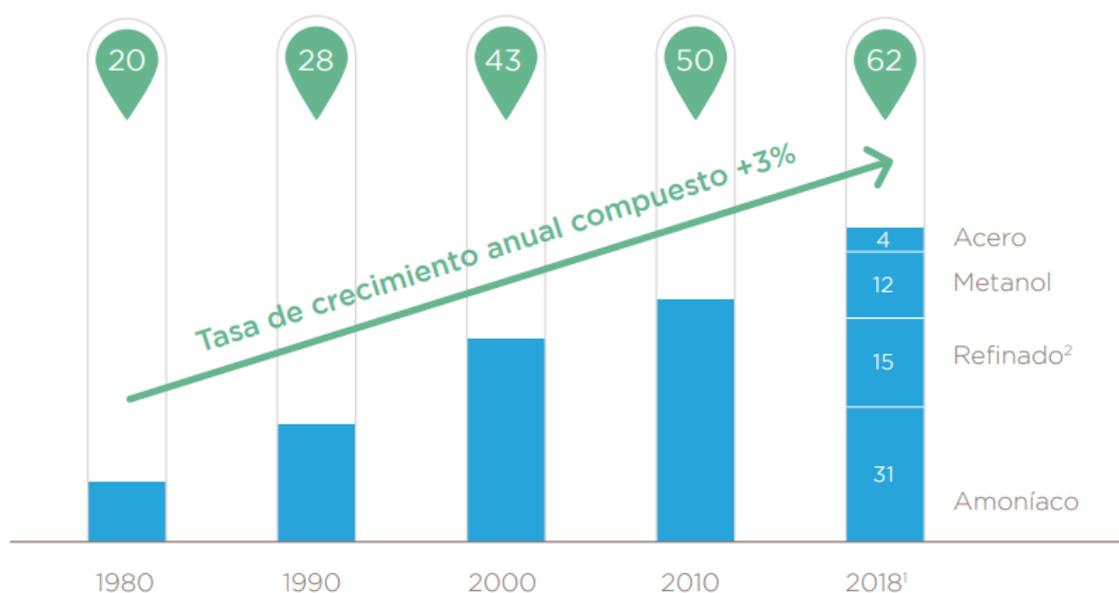
De manera paralela, el hidrógeno se erige como una alternativa efectiva en la generación de calor industrial, ofreciendo una opción más limpia y sostenible en contraposición a las fuentes de energía convencionales.

Estos usos ejemplifican la versatilidad del hidrógeno como una solución esencial para la reducción de emisiones y la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono en diversos sectores industriales.

Hidrógeno verde como ventana oportunidad de inversión

La utilización del hidrógeno como insumo en diversas industrias no constituye un fenómeno novedoso. Como ilustra de manera elocuente el próximo gráfico, la demanda global de hidrógeno ha experimentado un crecimiento continuo a lo largo de las últimas décadas. Es preciso destacar que dicha demanda ha registrado un incremento medio del 33% por cada década transcurrida desde la década de los años 80.

Proyección de demanda de Hidrógeno verde (Millones de toneladas)



Fuente: Anouti, Elborai, Kombargi, & Hage, 2020

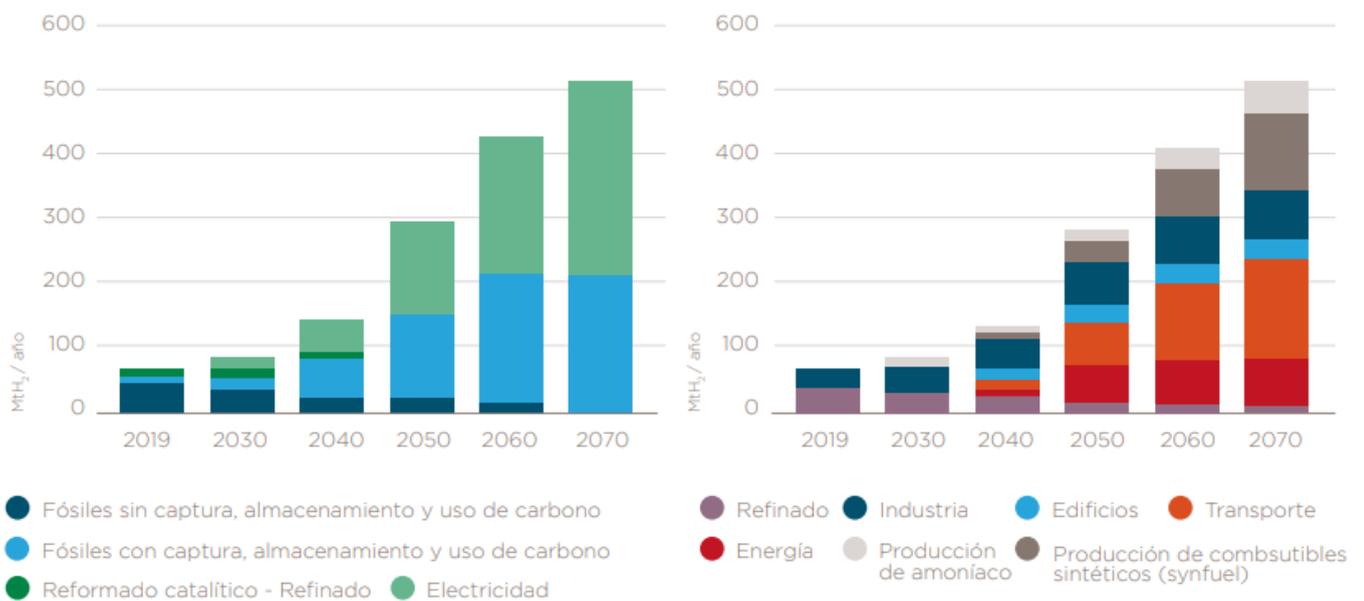
En la actualidad, el hidrógeno empleado se genera en su mayoría a partir de combustibles fósiles, conocido como hidrógeno gris (véase Figura 2). No obstante, se proyecta un notorio incremento en la producción de hidrógeno en los próximos años.

Este aumento estará liderado principalmente por la producción de hidrógeno verde, que implica la utilización de energía de origen renovable para llevar a cabo la electrólisis y separar las moléculas de hidrógeno. Asimismo, se espera que el hidrógeno azul cobre relevancia, dado que implica el empleo de energía proveniente

de fuentes fósiles, pero con la implementación de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento del carbono emitido (CCUS por sus siglas en inglés).

Como se ilustra en los siguientes gráficos, de acuerdo con las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2020), se anticipa que para el año 2050 la demanda de hidrógeno se elevará a aproximadamente cuatro veces la demanda actual, y que la mitad de esta demanda corresponderá al hidrógeno verde.

Proyección de producción de hidrógeno y sus usos



Fuente: *Extraído de "Hidrógeno verde: un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización" (Nov, 2021)*

Se anticipa un notorio aumento en la producción y demanda de hidrógeno, especialmente de hidrógeno verde, impulsado por varios factores interconectados:

1. La necesidad imperante de contar con tecnologías que permitan la electrificación de sectores de difícil descarbonización, en consonancia con los compromisos establecidos en el Acuerdo de París para limitar el calentamiento global a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales.
2. El creciente valor de los servicios de almacenamiento de energía, que se tornan cada vez más esenciales para equilibrar la oferta y demanda de electricidad, especialmente a medida que las energías renovables variables ganan competitividad y aumentan su participación en los sistemas eléctricos.

3. El interés de varios países en aprovechar sus recursos naturales económicamente explotables para crear nuevas corrientes de exportación de energía mediante el hidrógeno verde como vector energético.
4. La disminución de los costos de producción del hidrógeno verde gracias a la reducción de los costos de la energía renovable y otros componentes clave, como los electrolizadores. El costo de la energía, que puede representar hasta el 80% del costo total de producción, ha experimentado reducciones significativas en las últimas décadas.

Asimismo, los electrolizadores redujeron sus costos en un 60% en la última década, con perspectivas de continuar esta tendencia a medida que aumenta la escala de producción (BloombergNEF, 2020; Comisión Europea, 2020). Se prevé que, a partir de 2030, la producción de hidrógeno verde sea más económica que la del hidrógeno azul, incluso en mercados importadores clave (BloombergNEF, 2021; Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2021). Se estima que los costos de producción podrían disminuir en un 62% entre 2020 y 2030 (Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2021).

Puntos claves para invertir en energías renovables en Uruguay

1. Uruguay se encuentra en evolución posicionándose como una referencia a la vanguardia en la materia en lo que a energías renovables en el mundo refiere. Entre los años 2017 y 2021 un total de 94% de la generación eléctrica del país tuvo origen en fuentes de energía renovables. Como dato a destacar, la matriz de energía eólica Uruguaya se encuentra compartiendo el podio en el ámbito internacional junto a países como Dinamarca, Irlanda y Portugal.
2. Cifras de la última década marcan inversiones focalizadas a energías renovables en Uruguay por encima de los US\$ 8.000 millones.
3. El modelo utilizado en la primera etapa de transformación de la matriz energética de Uruguay fue una colaboración público-privada, donde el sector público cumplió un papel coordinador y administrador, generando un ecosistema seguro en cuanto a los inversionistas nacionales e internacionales.
4. IRENA³ ha enfatizado el modelo de promoción e incentivador de Uruguay, destaca la fuerte incorporación del sector privado hacia la transformación de la matriz energética. Además del aporte del sector en la inversión con esquemas de promoción independientes de subsidios directos.
5. Uruguay es direccionado hacia una fuerte transformación en la política energética, enfocada en planes a largo plazo, un marco institucional sólido y regulatorio que transita en paralelo conforme el plan avanza.
6. Los objetivos cumplidos se reflejan en la composición de la matriz energética nacional, en materia de autoabastecimiento y la independencia de combustibles fósiles. Uruguay se posiciona como el segundo país en el mundo en participación de energías renovables variables.
7. El compromiso energético de Uruguay está direccionado al objetivo de contribuir a la mitigación de emisión de gases de efecto invernadero y el concernimiento del cambio climático.

Según informe REN21 (2021)⁴

³ Agencia Internacional de las Energías Renovables

⁴ VRE generation: REN21 - Renewable 2021 Global Status Report.

Actualidad del componente

Los resultados principales indican que Uruguay, aprovechando sus abundantes recursos energéticos renovables, presenta el potencial para producir hidrógeno verde a un costo proyectado en el rango de 1,2 a 1,5 U\$S por kilogramo de H₂ para el año 2030. Este costo varía en función de la región específica considerada dentro del país. Estos valores se ubican en una franja competitiva a nivel internacional.

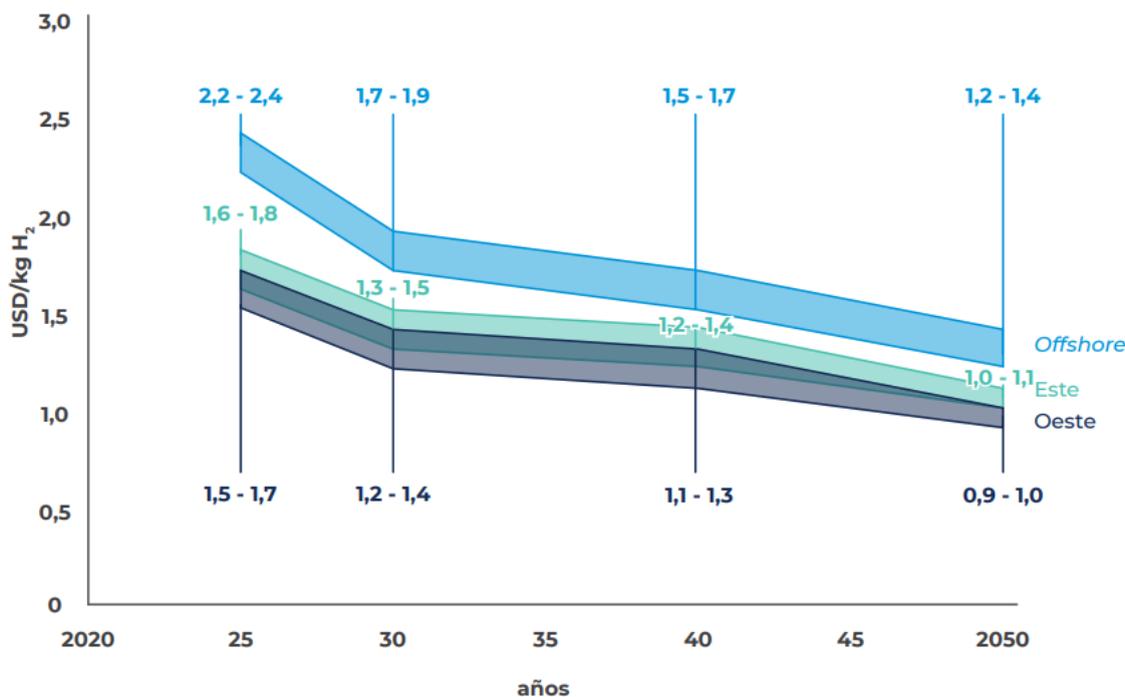
Considerando las condiciones de competitividad que caracterizan al país, los escenarios de demanda proyectados y las estrategias de adquisición de cuotas de mercado previstas, se estima que el mercado de exportación podría alcanzar una cifra aproximada de 1.300 millones de dólares anuales para el año 2040. Este crecimiento estaría impulsado principalmente por la producción de combustible sintético para la aviación (58%), seguido del hidrógeno verde (26%) y los combustibles sintéticos destinados a la industria marítima, especialmente el metanol (14%). Un valor añadido en la producción de combustibles sintéticos en el país radica en la utilización de CO₂ de origen biogénico.

Por otro lado, se estima que el mercado doméstico podría alcanzar alrededor de los 750 millones de dólares anuales para el año 2040, siendo impulsado principalmente por la demanda de hidrógeno destinado al transporte de carga terrestre, lo que representa el 48% de dicho mercado.

Fuente: *McKinsey & Company, 2021*

Curva de costo de producción para hidrógeno por región en Uruguay, USD/kgH₂

Estimaciones para caso de 250 toneladas de producción diaria mínima de H₂ incluyendo energía y electrólisis (CAPEX, OPEX inc. agua).
Almacenamiento, transporte o transmisión añaden 0,3 a 0,5 USD/KgH₂.



Fuente: McKinsey & Company, 2021

Los datos posicionan a Uruguay como un actor con costos competitivos en el horizonte de convertirse en un exportador neto de hidrógeno verde. Además de los costos intrínsecos a la producción de hidrógeno, es imperativo considerar los costos logísticos, los cuales engloban el transporte o la transmisión de electricidad y el almacenamiento, todos estos aspectos siendo determinantes según la configuración elegida y las futuras aplicaciones previstas para el hidrógeno.

En proyectos de envergadura sustancial, con capacidades superiores a los 500 MW, se ha demostrado que la opción más económicamente eficiente reside en el transporte y el almacenamiento local de hidrógeno a través de una red de gasoductos.

Esta proeza se logra mediante la implementación estratégica de plantas de electrólisis en estrecha proximidad a las instalaciones de generación de energía renovable. El costo inherente al transporte y almacenamiento local oscila en un rango de 0,3 a 0,5 U\$S por kilogramo de hidrógeno (U\$S/kgH).

Demanda externa de hidrógeno verde

De acuerdo con un estudio titulado "Insumos para la elaboración de Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde para Uruguay" (2022), se han identificado destinos cruciales en el mercado del hidrógeno verde, entre los que se destacan Estados Unidos, la Unión Europea y el Reino Unido.

Esto se debe a la expectativa de que estas regiones desarrollen mercados importadores sólidos en virtud de su compromiso inequívoco con la descarbonización, su capacidad adquisitiva significativa y posibles desequilibrios estructurales entre la oferta y la demanda. Además, estas áreas se encuentran geográficamente bien ubicadas en relación con Uruguay.

De acuerdo con estimaciones, se espera que el porcentaje de la demanda total abastecida por producción nacional en Estados Unidos (tanto en hidrógeno como en amoníaco) alcance un 65% para el año 2030 y un 85% para el año 2050. Para la Unión Europea y el Reino Unido, se proyecta que este porcentaje sea del 65% en el año 2023 y se mantenga en el 65% hasta el año 2050.

La clave en este contexto radica en la capacidad de Uruguay para desarrollar una infraestructura adecuada que permita conectarse con esta demanda externa, particularmente en el caso de Estados Unidos.

Las necesidades de importación por parte de los principales centros de demanda se concentran en cinco productos estratégicos. En primer lugar, el hidrógeno, cuya demanda se impulsa tanto en aplicaciones de transporte terrestre como en la industria, donde se utiliza como insumo clave en sectores como la siderurgia y las refinerías. Además, el hidrógeno juega un papel fundamental en la generación de energía eléctrica y en la producción de calor.

La industria marítima, en su búsqueda de cumplir con metas de descarbonización, genera un crecimiento en la producción de e-metanol y amoníaco (NH₃), este último siendo esencial en la fabricación de fertilizantes ecológicos. Asimismo, el e-Jet Fuel se posiciona como un componente crucial, impulsado por las regulaciones del sector de la aviación que requieren la incorporación de Combustibles para Aviación Sostenibles (SAF, por sus siglas en inglés).

Por último, el hierro reducido (DRI, Direct Reduced Iron, en inglés) experimenta una creciente demanda debido al auge del acero verde en todo el mundo, en el cual el hidrógeno desempeña un rol primordial como insumo.

La magnitud de la oportunidad para Uruguay en términos de exportaciones de hidrógeno verde y sus derivados hacia los mercados europeos y estadounidenses dependerá de su competitividad en relación con otros países y regiones que podrían competir en este ámbito. Entre estos posibles competidores se encuentran Medio Oriente, Brasil, Chile y el norte de África. Es importante destacar que la competitividad puede variar dependiendo de los productos específicos y los destinos considerados.

Potencial exportación de hidrógeno verde:

La proyección del mercado global de hidrógeno verde hacia el año 2040 sugiere la posibilidad de alcanzar un volumen de demanda aproximado de 29 millones de toneladas, con un valor estimado de alrededor de 31 mil millones de dólares, de acuerdo con el escenario base establecido por insumos para la elaboración de hoja de ruta de Hidrógeno Verde para Uruguay 2022

En este contexto, se estima que Uruguay podría acceder a una porción significativa de esta demanda global, con un valor proyectado que oscilaría entre los 700 y 1000 millones de dólares.

A corto plazo, los actores principales en la creciente demanda de hidrógeno verde en los mercados de destino se centran en dos sectores clave: el transporte pesado por carretera y la industria. En el ámbito del transporte, esta demanda se impulsa principalmente por la creciente adopción de camiones con celdas de combustible de hidrógeno (FCEV⁵). En la industria, el hidrógeno verde se utiliza cada vez más en refinerías de petróleo y en la producción de hierro y acero, contribuyendo a la descarbonización de estos procesos.

A medida que nos adentramos en el largo plazo, los impulsores de la demanda siguen siendo similares, pero otras aplicaciones del hidrógeno comienzan a adquirir una mayor importancia relativa.

Se estima que, hacia el año 2030, Uruguay mantendrá costos competitivos comparables a los de sus competidores en el Reino Unido, la Unión Europea y Estados Unidos, especialmente en el ámbito del transporte marítimo utilizando hidrógeno líquido (LH₂). Sin embargo, se prevé que el mercado europeo pueda ofrecer una mayor competencia, especialmente considerando la posibilidad de establecer conexiones mediante ductos entre las regiones del norte de África y el continente europeo. La competitividad final de Uruguay dependerá en última

⁵ Vehículo de celda de combustible.

instancia de la evolución de la tecnología de transporte marítimo y del desarrollo de la infraestructura de ductos de transporte en Europa.

En función de los análisis efectuados y la competitividad de Uruguay, considerando las demandas proyectadas en los mercados potenciales, las exportaciones de hidrógeno verde lograron alcanzar en proyecciones un valor aproximado de 340 millones de dólares para el país.

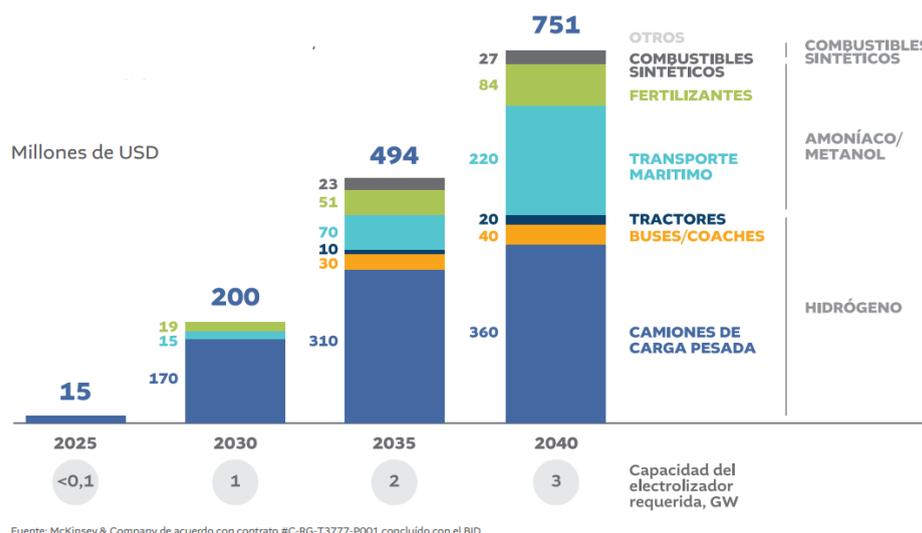
Demanda interna de hidrógeno verde:

Dentro de la dinámica interna del país, se perfilan oportunidades estratégicas que indican que la proyección del mercado doméstico podría alcanzar un valor aproximado de 751 millones de dólares para el año 2040.

En particular, en el ámbito del transporte pesado, donde los camiones y autobuses surgirían como los principales motores de la demanda, representando esencialmente la totalidad del crecimiento del mercado interno uruguayo.

En un plano secundario, los combustibles sintéticos desempeñarán un papel relevante, especialmente en el contexto del transporte marítimo, seguidos de cerca por los fertilizantes.

Proyecciones de demanda interna en millones de USD

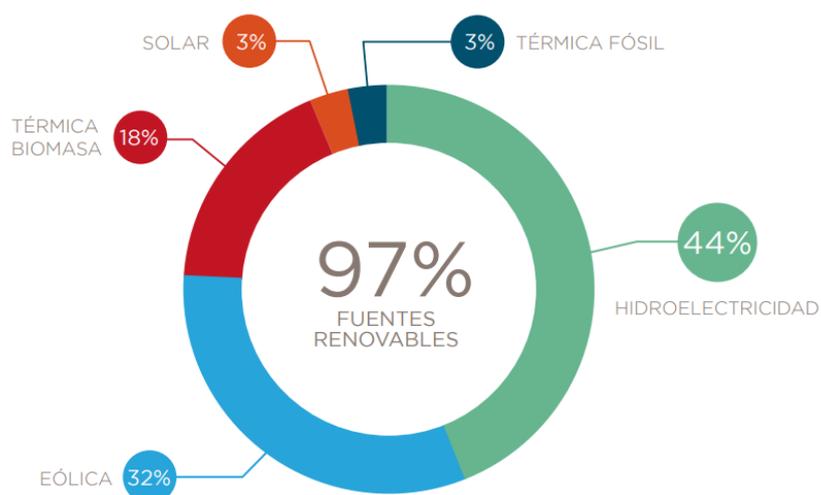


Fuente: Insumos para la elaboración de Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde para Uruguay (2022)

Ventajas competitivas de Uruguay como productor de H₂ verde

En la última década, Uruguay ha llevado a cabo un proceso de descarbonización de su matriz energética mediante la transformación de la composición de sus fuentes de energía. En este contexto, se ha implementado la inclusión de tecnologías energéticas vanguardistas, tales como la energía eólica, solar y biomasa.

Como resultado de esta iniciativa, se ha logrado un hito significativo en los años comprendidos entre 2017 y 2020, en el cual el 97% de la producción energética nacional proviene de fuentes de energía renovable. Este hecho se documenta de manera gráfica en la siguiente representación visual.



Fuente: MIEM 2020

En pos del logro del primer objetivo de descarbonizar la matriz eléctrica, Uruguay se encuentra en una etapa avanzada de su segunda fase, centrada en las transiciones energéticas que afectan al sector del transporte y otros consumidores significativos de energía, especialmente aquellos vinculados con la industria de alta intensidad energética.

El hidrógeno verde emerge como una valiosa oportunidad para la descarbonización en el ámbito del transporte pesado. Este sector, que representa el 4% de la flota total, contribuye con un considerable 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el transporte por carretera. Además, su demanda energética se caracteriza por ser de difícil electrificación.

Uruguay ostenta diversos atributos que lo sitúan en una posición altamente propicia para la producción de hidrógeno verde. En primer lugar, se destaca la disponibilidad de una cuantiosa reserva de electricidad proveniente de fuentes renovables, respaldada por un inmenso potencial de generación de energía de índole no convencional, tanto en tierra firme como en alta mar.

Adicionalmente, el país exhibe la ventaja de una complementariedad notable entre la energía eólica y la solar, lo que constituye un factor clave en la consolidación de su perfil como productor de hidrógeno verde.

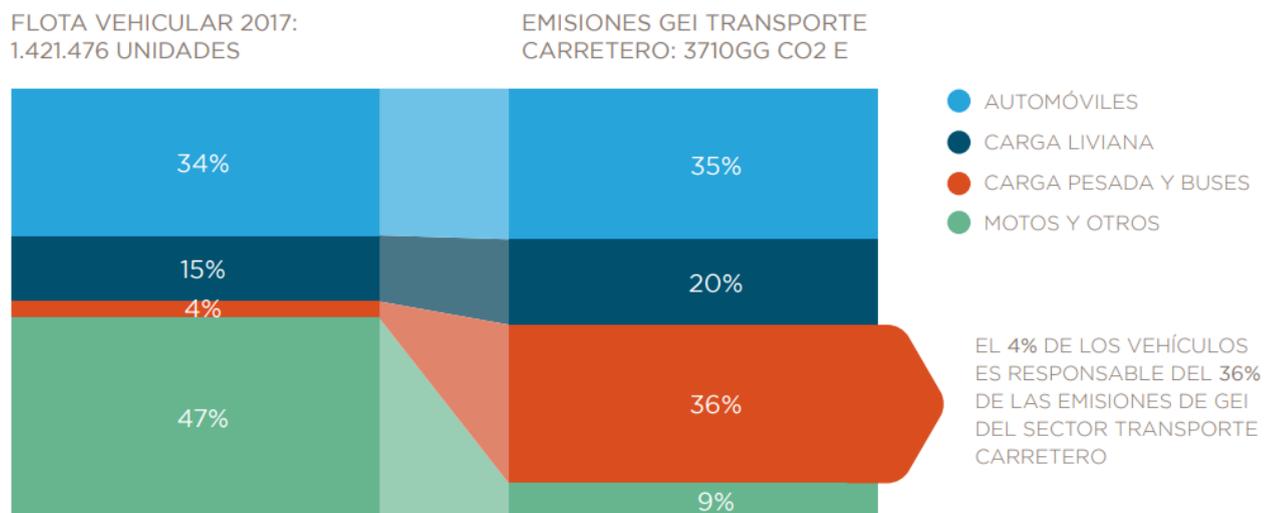
Asimismo, Uruguay presenta una serie de atributos que lo tornan particularmente atractivo para la materialización de inversiones en este ámbito. Entre estos destacan su condición de democracia plena y su robusta estabilidad sociopolítica, factores que colaboran en la generación de un ambiente propicio para el desarrollo de proyectos en el sector energético. (Fuente: Unidad de Inteligencia de The Economist, 2021)

Hilo de proposiciones en base a Hidrógeno verde

Descarbonización del transporte

Dentro de Uruguay se detecta que el rubro transporte es una matriz consolidada principalmente en combustibles fósiles, siendo dentro de la misma el transporte pesado el de mayor responsabilidad.

Dentro de la carga pesada y buses representan el 4% de la flota total vehicular del país pero son responsables del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los vehículos de carga pesada y buses representan el 4% de la flota vehicular de Uruguay, sin embargo son responsables del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero.



Fuente: Extraído de "Hidrógeno verde: un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización" (Nov, 2021)

Transporte a partir de H₂:

El empleo del hidrógeno como combustible alternativo en el ámbito del transporte se destaca como un área de gran potencial. Al optar por el hidrógeno como fuente de energía en el transporte, se promueven iniciativas destinadas a la reducción de emisiones contaminantes y se impulsan estrategias encaminadas hacia la diversificación y la autosuficiencia energética.

La tecnología de vehículos eléctricos impulsados por hidrógeno se considera una opción de emisiones nulas, siempre y cuando el hidrógeno utilizado sea producido a partir de fuentes de energía renovable. Esta tecnología coexiste con otras tecnologías emergentes y una amplia gama de combustibles en el panorama futuro.

Esto se debe a que el hidrógeno puede ser generado localmente a partir de diversas fuentes mediante una variedad de tecnologías. Además, cuando se combina con energías renovables o procesos sostenibles, el hidrógeno se transforma en un combustible con emisiones nulas en todo su ciclo, desde su producción hasta su utilización en el transporte, lo que se conoce como *"desde el pozo a la rueda"*.

Se proyecta que hasta el año 2030, la movilidad terrestre constituirá uno de los principales sectores de consumo final de hidrógeno, con una producción acumulada estimada de aproximadamente 10 millones de toneladas (MT). Esto posicionará a la movilidad como el segundo segmento de uso final más relevante para el hidrógeno limpio en el año 2030.

Se proyecta que alrededor del 60% de la demanda de hidrógeno en el contexto de la movilidad terrestre provendrá de camiones de carga pesada con requisitos específicos de larga distancia y alta potencia. Se estima que para el año 2030, aproximadamente el 11% de las ventas globales de camiones de carga pesada serán vehículos propulsados por celdas de combustible, lo que podría resultar en la reducción de unas 60 millones de toneladas de CO₂ al año en 2030. El fomento de la adopción de vehículos impulsados por hidrógeno hasta 2030 se torna fundamental para desarrollar la infraestructura necesaria y promover una mayor aceptación de la movilidad terrestre libre de emisiones de carbono.

Se prevé que los sistemas de propulsión basados en hidrógeno para camiones de carga pesada sean competitivos en la mayoría de las regiones entre los años 2025 y 2035. Esta competitividad se extiende incluso a comparación con los motores diésel de combustión interna y los esquemas de impuestos diésel existentes, sin que implique un costo adicional en términos de emisiones de CO₂.

Los vehículos eléctricos a batería tienden a ser menos atractivos en situaciones de alto rendimiento o elevada demanda, debido a la influencia del peso de las baterías, las restricciones en la autonomía y el tiempo necesario para recargarlas. En el contexto de los camiones de carga pesada, el factor crucial que determinará su competitividad radica en el costo del combustible. En este sentido, dos factores serán impulsores de la competitividad en cuanto a los costos del hidrógeno.

En primer lugar, se anticipa una disminución sustancial de los costos relacionados con el suministro de combustible, gracias a las economías de escala en la producción de hidrógeno y al incremento en la utilización de la infraestructura correspondiente.

En segundo lugar, las celdas de combustible ofrecen una eficiencia superior en comparación con los motores de combustión interna, lo que permite un aprovechamiento más eficaz de la energía contenida en el combustible.

La infraestructura de repostaje desempeña un papel fundamental en la promoción de la adopción generalizada del hidrógeno en la movilidad terrestre. Los consumidores finales mostrarán su disposición a adquirir vehículos propulsados por hidrógeno solo si cuentan con acceso garantizado a estaciones de recarga.

Es esencial que se construyan estaciones de recarga en proximidad a las principales rutas de transporte y centros logísticos. En Europa, por ejemplo, se ha planteado el objetivo de establecer una estación de recarga de hidrógeno (HRS) cada 150 kilómetros para fomentar la aceptación de los vehículos de hidrógeno.

Además, la provisión de hidrógeno limpio a estas estaciones de recarga puede lograrse mediante la producción *in situ*⁶, aprovechando la electricidad de bajo costo, o mediante su suministro desde instalaciones de producción cercanas.

Continuando la enfatización del análisis, Según las proyecciones de ANFAC (*Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones*), se estima que para el año 2030, los vehículos de hidrógeno representarán aproximadamente el 12% del mercado, incrementándose a alrededor del 23% para el año 2040 y alcanzando una participación estimada del 35% para el año 2050.

Estas proyecciones indican un notable crecimiento en la adopción de vehículos de hidrógeno en el sector del transporte, lo que enfatiza su potencial y su papel fundamental en la transición hacia una movilidad más sostenible.

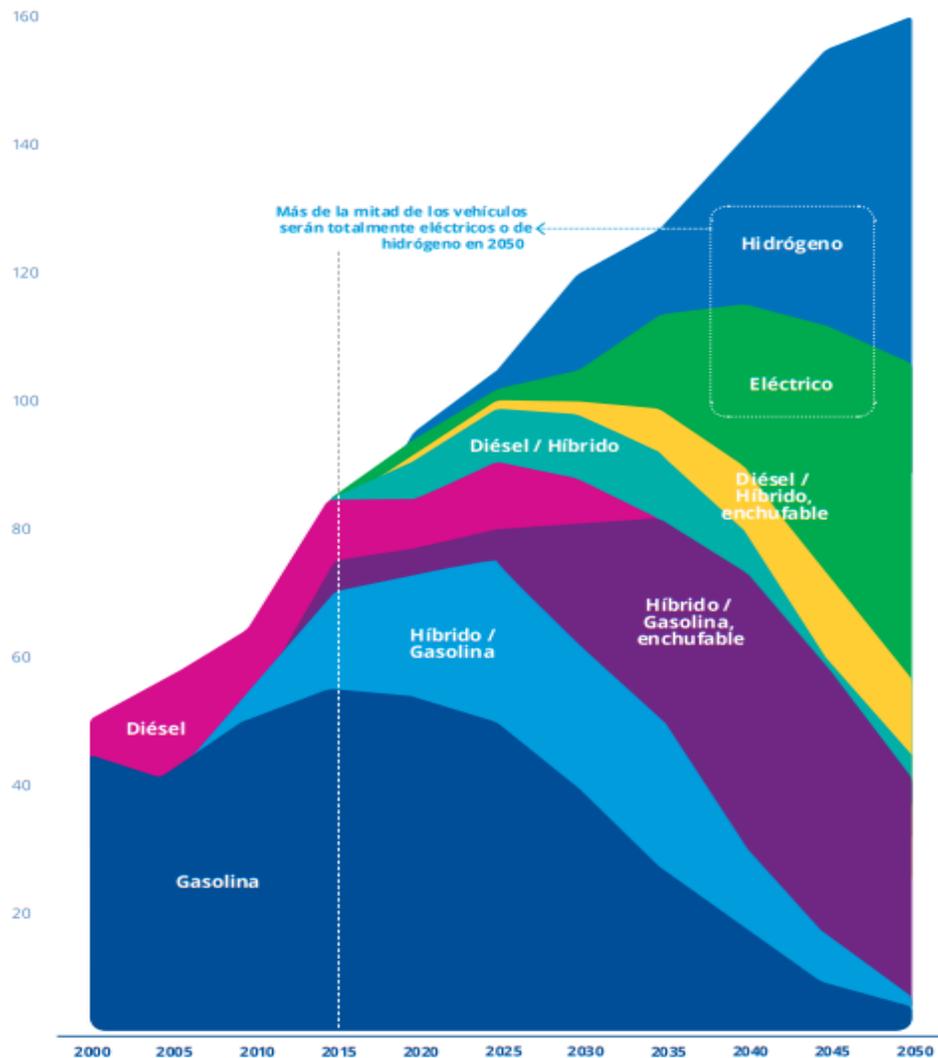
⁶ 'en el sitio, sobre el terreno'

A su vez, podemos considerar la adopción masiva de vehículos de hidrógeno a través de un estudio realizado por el Hydrogen Council. Este estudio tiene en cuenta la naturaleza del transporte y la autonomía requerida, dividiendo el mercado entre vehículos eléctricos de batería y vehículos eléctricos con celdas de combustible de hidrógeno.

Este análisis revela que a medida que el vehículo aumenta su tamaño y se requiere una mayor autonomía, los vehículos de hidrógeno ofrecen un rendimiento más ventajoso. Esto sugiere que los vehículos de hidrógeno son especialmente adecuados para aplicaciones que demandan dimensiones más grandes y una mayor autonomía, presentando una solución efectiva y eficiente en estas circunstancias específicas.

Proyección de producción

(Adaptado de Agenda sectorial de la industria de la automoción, p.89)



Fuente: Agencia internacional de energía (2019)

Descarbonización del transporte mediante vehículos de celdas de combustible (FCEV)

Los vehículos eléctricos de pila de combustible, también conocidos como FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*), son aquellos que obtienen su energía eléctrica mediante un proceso electroquímico que involucra la reacción del hidrógeno y el oxígeno del aire en una pila de combustible. Estos vehículos son impulsados por electricidad y disfrutan de todas las ventajas y prestaciones asociadas a esta tecnología.

Los FCEV se consideran vehículos de emisiones nulas, lo que significa que no generan emisiones contaminantes durante su funcionamiento, siempre y cuando el hidrógeno utilizado se produzca a partir de fuentes de energía renovable. La única producción secundaria en la pila de combustible es vapor de agua, el cual se expulsa a través del sistema de escape.

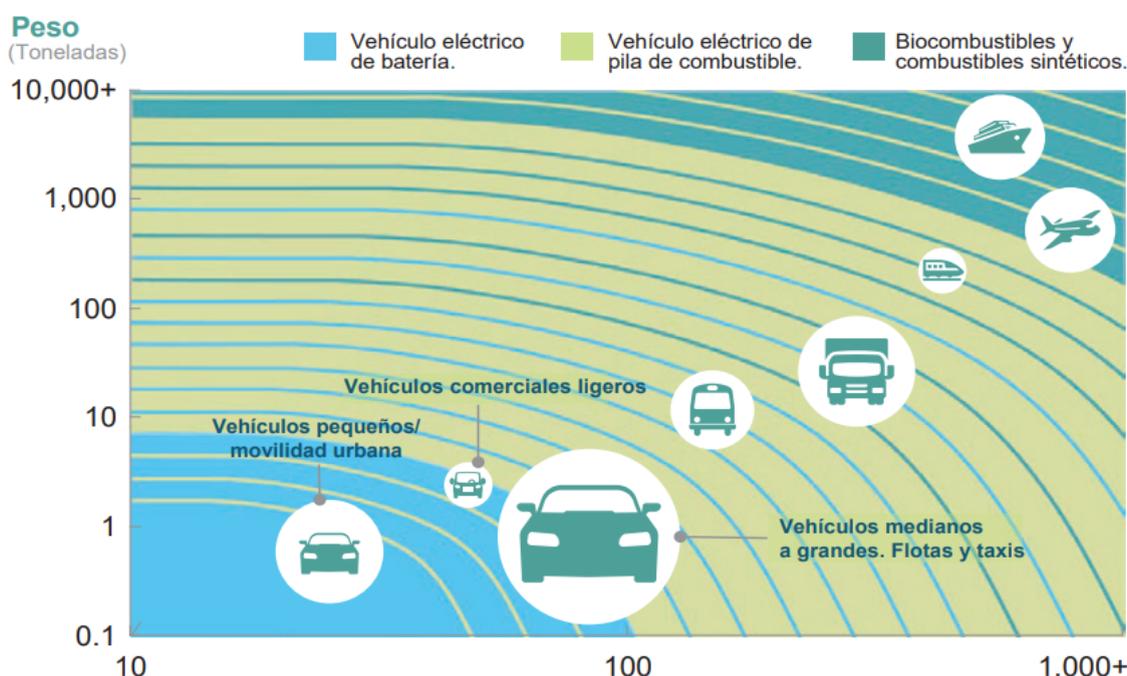
Los FCEV son vehículos eléctricos que ofrecen un rango de conducción y tiempos de repostaje similares a los vehículos convencionales. Desde esta perspectiva, estos vehículos amplían la viabilidad de la movilidad eléctrica en segmentos de alto desgaste, como camiones de larga distancia, autobuses, trenes, transbordadores y vehículos utilitarios como montacargas, donde las baterías actuales presentan limitaciones.

Por lo tanto, el hidrógeno debe ser considerado como un complemento de los BEVs (vehículos eléctricos de batería) en el contexto más amplio de la transición energética. Aunque pueden competir en algunos segmentos del mercado, tanto los FCEV como los BEVs ofrecen claras ventajas competitivas en cada segmento específico.

El siguiente gráfico ilustra esta sinergia y ofrece una división del sector del transporte en función del peso del vehículo y la distancia de conducción necesaria. Para cada segmento del mercado, se presentan las ventajas de tres tipos de trenes motrices alternativos: BEV (vehículos eléctricos de batería), FCEV (vehículos eléctricos de pila de combustible) y combustibles sintéticos basados en biomasa e H₂ (hidrógeno).

Implementación tecnológica proyectada.

(Adaptado de How hydrogen empowers the energy transition, p.8)



Fuente: *Hidrógeno verde como vector energético. (2019)*

Si bien los BEVs (vehículos eléctricos de batería) son altamente adecuados para vehículos más pequeños y ligeros que viajan distancias cortas, los FCEV (vehículos eléctricos de pila de combustible) ofrecen ventajas para vehículos más pesados que viajan distancias más largas, como camiones, autobuses regionales e interurbanos, etc., así como para vehículos con una alta tasa de utilización, como taxis. Además, los FCEV combinarán la flexibilidad del hidrógeno con la eficiencia de los BEVs, lo que podría convertirlos en la opción más económica a largo plazo.

FCEV tiene un potencial a corto plazo en los mercados de vehículos pesados (camiones y autobuses). Este es un segmento en el cual se espera que el hidrógeno y las pilas de combustible desempeñen un papel importante y tengan ventajas claras sobre los BEVs (vehículos eléctricos de batería) para los usuarios, como el tiempo de recarga de batería y la distancia de conducción.

Los autobuses impulsados por pilas de combustible han sido probados y validados en situaciones del mundo real. Los costos de fabricación han experimentado una notable disminución en los últimos años, y se anticipa que esta tendencia de reducción persistirá a medida que se incrementen los volúmenes de producción.

Por otro lado, los camiones de pilas de combustible están en desarrollo y se espera que su despliegue a gran escala comience en los próximos años, especialmente en

los Estados Unidos, con compañías como Toyota y Nikola liderando el camino en esta área.

A corto y medio plazo, en este ámbito, el hidrógeno podría enfrentar competencia de vehículos que utilizan gas natural y biogás, los cuales también están siendo implementados a nivel global.

Con el avance de la tecnología y el desarrollo de infraestructura, se anticipa que los FCEV ganarán una posición prominente en el mercado de vehículos pesados debido a sus ventajas en términos de tiempos de repostaje y autonomía, lo que los convierte en una opción atractiva para flotas de transporte y operadores de autobuses.

Además de su aplicación en la movilidad terrestre, el hidrógeno también tiene el potencial de desempeñar un papel en la descarbonización del transporte ferroviario, marítimo y la aviación en un futuro a largo plazo.

Al igual que ocurre con los BEVs, la implementación de vehículos basados en pilas de combustible requiere una planificación coordinada para desarrollar una infraestructura de repostaje dedicada. El tipo y la cantidad de vehículos tienen un impacto directo en la tipología requerida de estaciones de repostaje de hidrógeno (HRS), que se diseñan en función de su capacidad y nivel de presión de salida de hidrógeno (350 o 700 bares).

Superar el desafío del dilema del *“huevo y la gallina”* representa el principal obstáculo que enfrenta la industria del hidrógeno en el sector de la movilidad, especialmente en lo que respecta al segmento de vehículos de pasajeros.

Por un lado, los fabricantes de vehículos muestran reticencia a invertir en la producción de vehículos de pila de combustible sin contar con una infraestructura de repostaje de hidrógeno adecuada, dado que los consumidores no adquieren vehículos para los cuales no existe la posibilidad de repostaje.

Por otro lado, las empresas relacionadas con la energía y los gases industriales no están dispuestas a implementar la infraestructura de hidrógeno requerida hasta que los vehículos de hidrógeno se vuelvan comercialmente viables, ya que pasarían varios años antes de que vean un retorno de su inversión. En varios países, los gobiernos están interviniendo para brindar apoyo financiero en este sentido.

Elaborar una “Estrategia Nacional de movilidad sustentable: Uruguay”

Es necesario realizar una estrategia globalizada capaz de enfocar las metas nacionales en cuanto al transporte sustentable, en paralelo con la utilización del hidrógeno verde como insumo.

Como objetivo principal del plan, Uruguay debe direccionar hacia objetivos de establecer ejes estratégicos, así como un plan de acción y metas claras que permitan un desarrollo sostenido y focalizado en el transporte sustentable nacional, desde una perspectiva integral, global y colaborativa.

Tanto el sector público como privado, tendrán el deber de colaborar con dicha estrategia, con vistas de plantar pilares claves hacia un lineamiento del plan a seguir.

Se proponen pilares claves sobre los cuales diseñar una estrategia efectiva.

1. Vías de transporte sustentable y el financiamiento de los mismos.

- a. Posibles instrumentos para incentivar el transporte de cero emisión.
- b. Proyección de transporte de cero emisión por segmentos.
- c. Diseño de economía circular en paralelo al sector transporte.
- d. Utilización de nuevas tecnologías y sus diferentes usos.

2. Infraestructura necesaria para carga y su regulación.

- a. Diseñar una red de cobertura de carga.
- b. Regulaciones necesarias.
- c. Tarifas e integración de la red.

3. Desarrollo de investigación, capital humano e innovación.

- a. Inversión en Capital Humano.
- b. Desarrollo de la industria nacional.
- c. Investigación e Innovación.

4. Plan informativo y difusión social.

- a. Transferencia de conocimiento.
- b. Planificación de cooperación de actores.

c. Involucramiento del ámbito internacional.

En base a los pilares mencionados, con afán hacía que el ciudadano Uruguayo goce de los beneficios directos e indirectos de un transporte sustentable proveniente de fuentes renovables.

De esta manera trabajar hacia una mejor calidad de vida, un desarrollo amigable con el medio ambiente y la responsabilidad de cumplimiento con las metas pactadas.

A continuación se proyectan puntos claves a considerar. Bajo estos puntos se debe transitar el desarrollo del plan estratégico de electromovilidad.

A. Estrategia hacia el carbono neutral.

El país está focalizado en la segunda transición energética direccionada hacia el carbono neutral. Se visualiza el inmenso desafío de lograr una economía cien por ciento descarbonizada, para ello el plan estratégico de actores cruciales como las energías renovables, el hidrógeno verde y la eficiencia energética pueden impactar en distintos sectores a nivel de economía nacional.

Dentro de ellos, la electromovilidad y los esfuerzos de incentivo hacia la eficiencia energética en el rubro de transporte deberán ser puntos cruciales para que Uruguay logre su cometido.

B. Urbanización e integración de ciudades.

El aumento de la flota vehicular proyectada, a pesar de que tome insumos en fuentes sustentables, está correlacionada con una mayor congestión en las vías principales de la ciudad. Con ello la movilidad urbana y su planificación traen consigo grandes desafíos en la adaptabilidad de la ciudad, su vía y espacio públicos, que junto a la electromovilidad deberán coordinar meticulosamente sus movimientos.

C. Desarrollo de energías limpias a través del rubro transporte.

Para que la electromovilidad tome el protagonismo en la economía local, debe disminuir significativamente las emisiones provenientes de la matriz eléctrica, dentro de la cual se encuentran los insumos para carga de dichos vehículos.

Por lo anteriormente mencionado, es de suma importancia que la electrificación del transporte público/privado avance en simultáneo con la descarbonización del sector nacional de generación eléctrica.

D. Vistas en el desarrollo sustentable.

Se debe avanzar con paso firme, manteniendo al margen las necesidades de Uruguay, proyectando una evolución focalizada al largo plazo, a su vez enfatizando las herramientas en el avance tecnológico, desarrollando el bienestar de la sociedad, el crecimiento económico y la sustentabilidad ambiental.

E. Evolución local a partir del transporte sustentable.

Con bases en los avances tecnológicos del sector, los cuales atraerá innovación y actividad nacional, donde deberán trabajar en conjunto los actores del ámbito público y privado. Se espera que así, la evolución en el rubro traiga consigo desarrollo de empleo y crecimiento en el capital humano que añadan valor agregado.

F. Transporte limpio como insumo para una mejor calidad social.

Se logran visualizar múltiples beneficios de la electromovilidad en la calidad de los ciudadanos. Entre los principales se encuentra reducir considerablemente la contaminación en las zonas urbanas, colaborando con la evolución hacia ciudades limpias y amigables acústicamente, además de producir un ahorro económico.

Junto a los anteriores puntos claves y una implementación de metas claves, se debe transitar la estrategia propuesta para transformación de la matriz transporte del país, en vista de un desarrollo sustentable de la mano del Hidrógeno verde.

Continuando en los pilares claves, desarrollando el detalle para un mejor análisis. Se logra desarrollar una breve reseña del motivo de los mismos.

1. Vías de transporte sustentable y el financiamiento de los mismos.

Dentro del primer pilar, se proyecta la estrategia de cómo incrementar la cantidad vehicular eléctrica de Uruguay, los cuales se realizan a través de un alineamiento de instrumentos que fomenten la electromovilidad.

Con lo mencionado se procura reducir dificultades relacionadas a la asimetría, por ejemplo entre vehículos de combustión interna y eléctrica o con celdas de

combustible. A su vez promulgando para potenciar la creación de un ecosistema idóneo para economías circulares en la electromovilidad y la incorporación de nuevas tecnologías.

En foco de superar posibles barreras a presentarse en la migración hacia una electromovilidad, se debería enfocar en el estudio y post aplicación de incentivos indirectos como estacionamientos preferenciales, zonas exclusivas de circulación, incentivos arancelarios para vehículos eléctricos/celdas de combustible.

Conjuntamente se podría estudiar la implementación de medidas para desestimular la compra y uso de vehículos con alto grado contaminante. Dentro de estas medidas podría actuar el *Ministerio de Ambiente, Ministerio de Transporte y Obras Públicas*.

A su vez se debería invertir en la incorporación de nuevas tecnologías direccionadas al transporte público, pensar en buses y taxis públicos en un ámbito de electromovilidad.

Adicionalmente, se necesitará trabajar en instrumentos económicos que incentiven a tecnologías limpias y energéticamente eficientes. Podría actuar aquí el Ministerio de Economía y Finanzas.

El mencionado recambio de vehículos se dará de manera paulatina a medida que los costos de los mismos tiendan a bajar, es más conveniente que los primeros en realizar el cambio sean los de mayor recorrido anual (económicamente hablando es de mayor conveniencia ya que tienen una vida total mayor). A su vez se debe enfocar la visión en la migración del transporte público a un modelo de electromovilidad.

2. Infraestructura necesaria para carga y su regulación.

Si bien actualmente existe una red de carga para vehículos eléctricos en el país, se debe diseñar una estructura planificada para una red de carga nacional, donde se podrá contar con estaciones tanto para vehículos eléctricos como vehículos con FCEV.

A su vez esta promoción de red de cargas, debe ser planificada para funcionar en las carreteras del país, pensando en la migración del transporte pesado hacia la electromovilidad, a partir de hidrógeno verde, debe estar coordinado para ofrecer facilidades al sector logístico del Uruguay.

Es fundamental desarrollar un plan de tarifas para la carga eléctrica de la flota vehicular con el fin de contrarrestar el impacto de la congestión de vehículos en ubicaciones críticas de carga.

3. Desarrollo de investigación, capital humano e innovación.

Se debe fomentar intensamente los incentivos que promuevan el uso energético eficiente en el transporte, que velen por el bienestar del país y su sustentabilidad con el fin de dejar plantadas sólidas bases en la materia y capacidades en torno a la eficiencia energética y electromovilidad.

Existirá la necesidad de realizar investigaciones que estudien el amplio abanico de la electromovilidad y en paralelo su desarrollo. Dicha tecnología avanza a pasos agigantados por ende estudios que garanticen su correcto uso y aplicación aportaran valor a el plan estratégico.

4. Plan informativo y difusión social.

Dentro de los acuerdos públicos-privados representa una instancia para unir fuerzas en vistas de conseguir cumplir objetivos y desafíos planteados por la electromovilidad y la sustentabilidad del país.

La principal idea de realizar un Plan estratégico Nacional de Electromovilidad es planificar detalladamente un plan de ruta para migrar y optimizar la matriz energética del país, utilizando como insumo el Hidrógeno verde y direccionado a incrementar niveles de sustentabilidad en el país.

Metanol verde como combustible sustituto.

El metanol (CH_3OH), también denominado alcohol metílico, constituye un compuesto químico de elevada demanda, debido a su diversificada aplicabilidad en el ámbito industrial. Este compuesto desempeña funciones como solvente, agente anticongelante, componente en la manufactura de materiales de construcción, y contribuye a la producción de combustibles sintéticos, entre otras múltiples aplicaciones.

La propiedad distintiva de mantenerse en estado líquido a temperatura ambiente facilita su transporte y almacenamiento de forma eficiente. Esta versatilidad y capacidad de manipulación convierten al metanol en un recurso químico de alto valor para diversas ramas de la industria, satisfaciendo una amplia diversidad de necesidades y exigencias.

Este compuesto químico posee características que lo destacan como un componente esencial en la transmisión de energía. En el año 2021, tanto la Agencia Internacional de Energía Renovable como el Instituto del Metanol identificaron al metanol renovable como un recurso con atributos óptimos para contribuir a la descarbonización en Europa (Perez-Blanco, 2021).

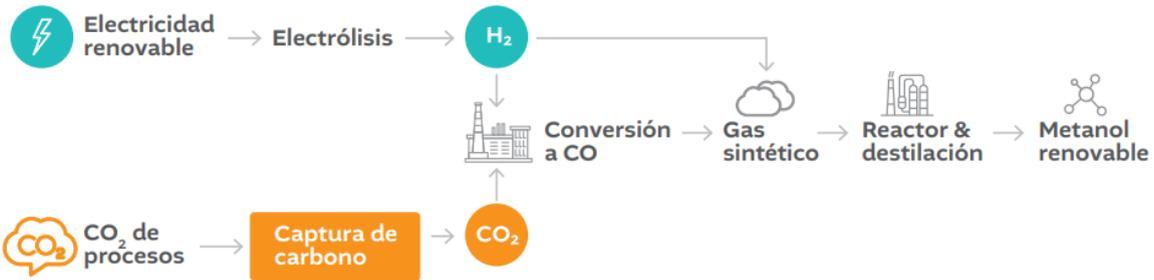
En virtud de lo anteriormente expuesto, el metanol verde ha experimentado un renacimiento como alternativa de combustible para embarcaciones y buques de transporte.

En el año 2019, el consumo global de metanol alcanzó las 98 Mega toneladas (Mt) durante ese período, y en los últimos años, este consumo se ha duplicado, siendo principalmente atribuible al crecimiento constante de China.

Del total consumido, un 31% se destina al uso final como combustible. De acuerdo con las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía Renovable, se anticipa un continuo incremento en su consumo, llegando a cifras de 120 Mt para el año 2025 y 500 Mt para el año 2050. Se estima que de estas 500 Mt, 250 provendrán de la producción de E-metanol y 150 de bioetanol.

Los costos relacionados con la producción de metanol a partir de fuentes de combustibles fósiles oscilan en el rango de precios de U\$S 100 a U\$S 250 por tonelada, según datos de la *Agencia Internacional de Energía Renovable (2021)*.

RUTA DEL METANOL



Fuente: Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay (Dic, 2022)

Sus características primordiales lo consolidan como un combustible de fácil aplicación y manejo, además de ser altamente compatible con la mayoría de los motores actuales. En consecuencia, se posiciona como un componente clave y pionero en la transición hacia la descarbonización en el ámbito marítimo.

El metanol verde se produce mediante la captura de CO_2 del aire y su combinación con hidrógeno verde. En particular, cuando la electricidad empleada para la separación del oxígeno y el hidrógeno en el agua (H_2O) proviene de fuentes renovables como la energía eólica o solar, la producción de metanol verde se torna completamente sostenible, no contaminante y amigable con el medio ambiente.

Existen dos métodos principales para la producción de metanol verde:

Biometanol: Este tipo de metanol se obtiene mediante la gasificación de fuentes sostenibles de biomasa, como residuos ganaderos, agrícolas, forestales y desechos urbanos.

Este proceso transforma la biomasa en metanol a través de una serie de reacciones químicas, eliminando así la necesidad de emplear combustibles fósiles y minimizando las emisiones contaminantes.

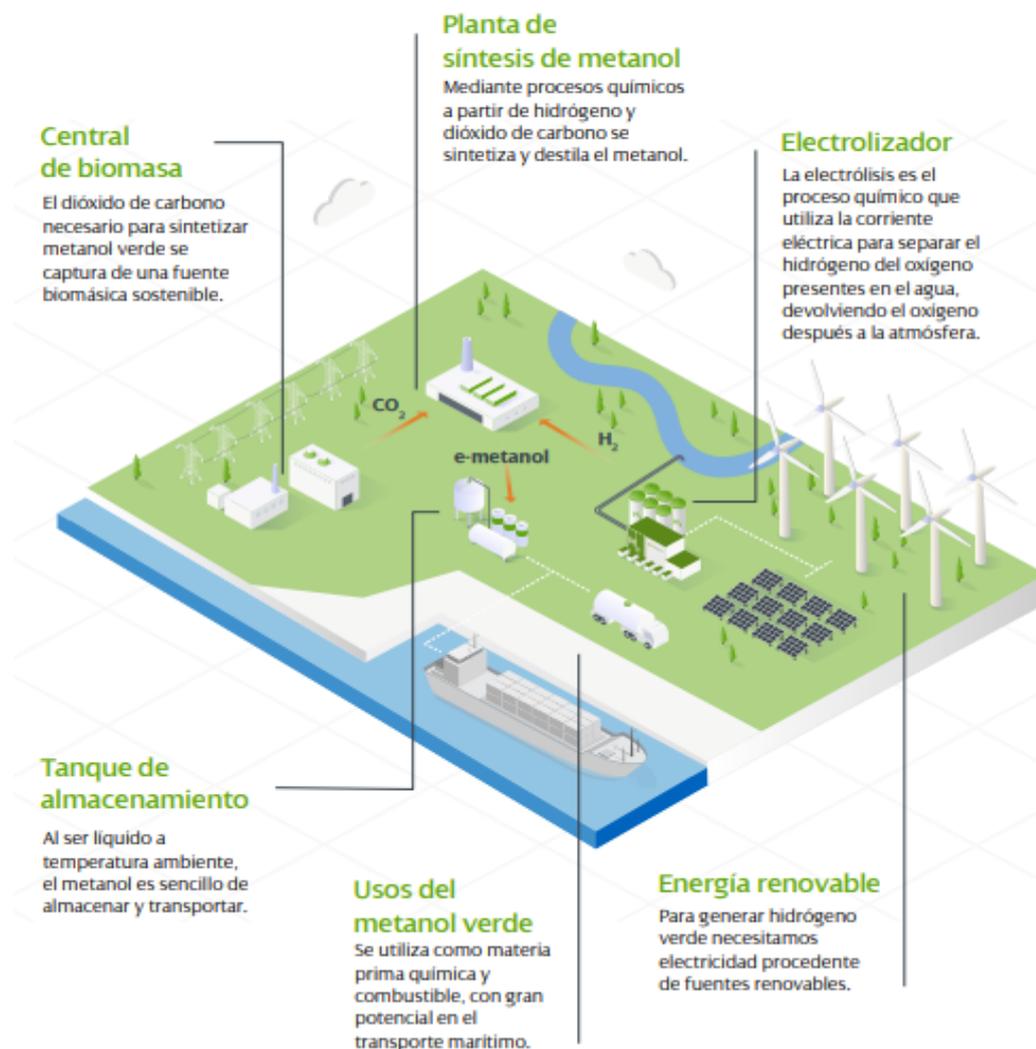
E-metanol: La producción de E-metanol se basa en la generación de hidrógeno mediante la electrólisis, utilizando electricidad renovable (conocida como hidrógeno verde), y dióxido de carbono capturado de fuentes industriales o directamente de la atmósfera.

⁷ El equivalente de CO_2 o equivalente de dióxido de carbono, es una medida en toneladas de la huella de carbono. Huella de carbono es el nombre dado a la totalidad de la emisión de gases de efecto invernadero. La masa de los gases emitidos es medida por su equivalencia en CO_2 .

Estos componentes se fusionan para crear metanol, estableciendo un proceso de producción que recicla y reutiliza el CO₂ en lugar de liberarlo a la atmósfera.

Ambos métodos de producción de metanol verde desempeñan un papel fundamental en la transición hacia una economía más sostenible y con un menor impacto ambiental, ya que contribuyen a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y a combatir el cambio climático.

Cómo se produce el metanol verde a partir de hidrógeno verde



Fuente: Extraído de Iberdrola (2022)

La ambición de aumentar la producción de metanol verde abre oportunidades de crecimiento en el sector del hidrógeno verde destinado a la generación de E-metanol.

En cuanto a la infraestructura, el metanol presenta propiedades idóneas para su utilización y transporte en la industria marina. La mayoría de las instalaciones de almacenamiento y suministro empleadas hasta la fecha para otros combustibles pueden adaptarse para el uso de metanol con ajustes específicos, principalmente debido a su estado líquido a temperatura y presión ambiente. Esto simplifica la transición hacia el metanol en términos de infraestructura, ya que se aprovecha en gran medida la infraestructura existente, lo que resulta en una transición más fluida, cómoda y menos costosa en comparación con otros combustibles.

Adicionalmente, el metanol destaca por su excelente perfil de seguridad en comparación con otros combustibles, y puede almacenarse en tanques convencionales sin requerir refrigeración ni altas presiones. Este hecho se traduce en menores gastos asociados a la conversión y adaptación de la infraestructura, en contraste con la mayoría de los combustibles alternativos.

Por todas estas ventajas mencionadas, el metanol emerge como un claro contendiente para convertirse en uno de los principales combustibles alternativos en el contexto de la transición energética. De hecho, la firma consultora Drewry ha afirmado que es altamente probable que el metanol desempeñe un papel esencial en la consecución de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Su versatilidad, su perfil de seguridad y su capacidad de adaptación a la infraestructura existente lo consolidan como un referente y paradigma en la búsqueda de soluciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, tanto en el sector marítimo como en otros sectores.

En lo que respecta a la proyectada demanda externa de metanol verde, específicamente en el ámbito del transporte marítimo en Uruguay, este sector contribuye de manera significativa, representando aproximadamente un 2% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con el uso energético a nivel global. El transporte marítimo comparte similitudes con el sector aéreo en términos de concentración y regulación.

La Organización Marítima Internacional (OMI), el principal organismo regulador de este sector, ha intensificado sus objetivos a medida que avanzamos hacia las próximas décadas.

Se ha establecido el desafío de reducir en un 50% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del transporte marítimo para el año 2050, tomando

como referencia el año 2008. Además, se han establecido diversos objetivos relacionados con la disminución de la intensidad de carbono en este ámbito.

De manera similar al transporte aéreo, las regulaciones y estándares están evolucionando para imponer requisitos más rigurosos en lo que respecta a las emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente. Esto crea una ventana de oportunidad para la innovación en procesos y componentes más sostenibles.

A continuación, se muestra un cuadro extraído de *McKinsey & Company* que presenta las alternativas mencionadas:

Combustible	GEI	SOx	NOx	PM	TRLs (1-9)	TCO (HFO = 1)	
Fuel Oil Pesado (HFO)	Alto	Medio	Medio	Alto	8	1,0	
Diésel Marítimo (MGO)	Alto	Bajo	Bajo	Alto	9	1,2	
Gas Natural Licuado (GNL)	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	8	1,0	Desafíos combustibles futuros
Biodiésel (2a generación)	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	7	2,0	No requiere cambios en la infraestructura, desafío en la escalabilidad de la materia prima
Metanol (2a gen/sintético)	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	6	2,5	Barcos ya operables con metanol con escasas modificaciones; desafío en los costos
Amoníaco Verde	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	5	1,5	Sistema de suministro de motor en fase de prototipo; estándares de seguridad
Hidrógeno Verde	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	3	2,0	Requiere grandes volúmenes de almacenamiento

■ Combustibles actuales

■ Combustibles futuros

● Alto

● Medio

● Bajo

GEI: Gases de efecto invernadero

SOx: Óxidos de Azufre

NOx: Óxidos Nitrógeno

PM: Material Particulado

TRL: Nivel de Madurez de la Tecnología

TCO: Costo total de propiedad

Fuente: Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay (Dic, 2022)

El metanol verde, a pesar de no ser el líder en términos de costos, se destaca como un combustible con numerosas ventajas sobre sus competidores, lo que lo posiciona de manera favorable para su desarrollo. Una de sus principales fortalezas radica en la baja inversión requerida para adaptar la infraestructura y los sistemas de las embarcaciones. La infraestructura existente es adecuada, fácil de gestionar y puede expandirse de manera eficiente utilizando las materias primas disponibles.

En el contexto de la competitividad en Uruguay, el metanol verde emerge como el principal candidato como combustible en el sector del transporte marítimo. Esto se alinea con la visión de descarbonización de la matriz energética en el país. Se proyecta que el mercado de combustibles marítimos en Uruguay podría duplicar su valor, y las estimaciones indican que la ventana de oportunidad podría ascender a alrededor de 180 millones de dólares en las próximas décadas (Ferragut, Pablo et al., 23).

Indudablemente, Uruguay presenta ventajas comparativas muy favorables para la fabricación de combustibles sintéticos basados en hidrógeno verde, como el metanol y el combustible de aviación. Estas ventajas están vinculadas

principalmente a la existencia de dióxido de carbono (CO₂) disponible, generado por fuentes industriales que procesan biomasa sostenible.

La presencia de este CO₂ disponible y su potencial aplicación en la producción de combustibles sintéticos otorgan al país una posición estratégica y ventajosa para liderar la descarbonización en el sector del transporte marítimo. Además, el uso del metanol como combustible se perfila como una opción prometedora en este contexto. Estas oportunidades no solo tienen un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también representan una posibilidad significativa de desarrollo económico para Uruguay en la industria de los combustibles verdes y la adopción de tecnologías más sostenibles.

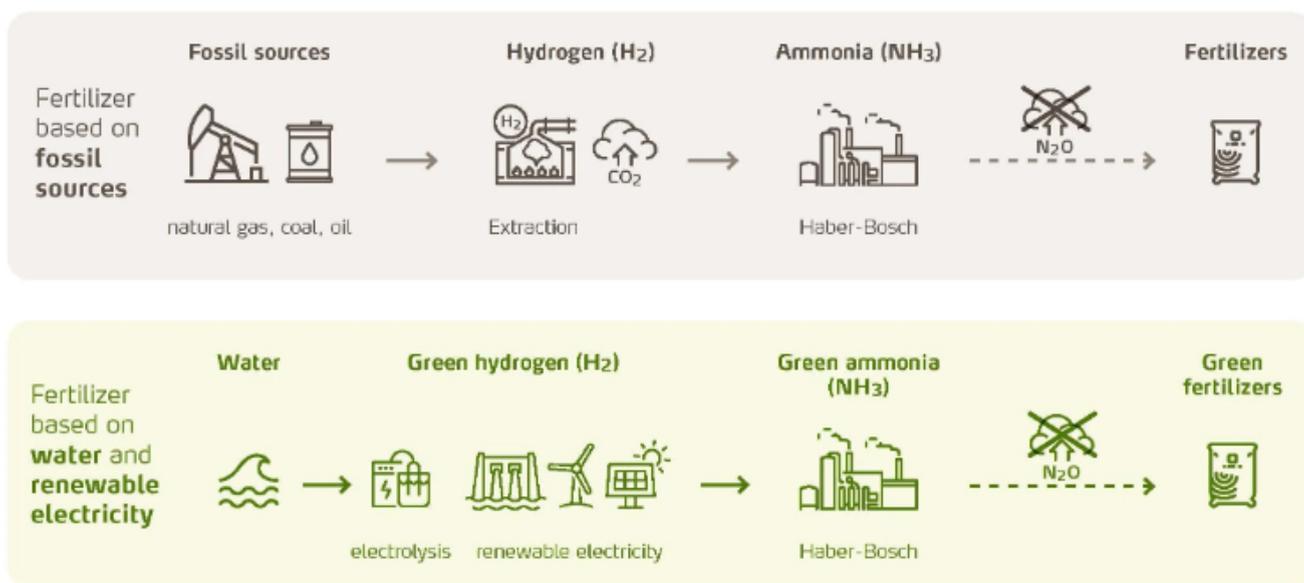
Amoníaco verde: Una solución a los fertilizantes.

El amoníaco verde, o también denominado amoníaco sustentable, representa una variante de amoníaco generada mediante el empleo de fuentes de energía renovable. Esta alternativa se configura como una solución sostenible exenta de emisiones y se erige como un recurso versátil con una amplia gama de aplicaciones en diversos ámbitos industriales y sectores.

El amoníaco desempeña un papel fundamental en una diversidad de aplicaciones, particularmente en la producción de fertilizantes agrícolas. No obstante, hasta tiempos recientes, la fabricación de amoníaco conllevaba considerables emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, la utilización intensiva de combustibles fósiles en el proceso de producción de amoníaco contribuye con un 1,8 por ciento de todas las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂). Esta cifra supera las emisiones asociadas a cualquier otra reacción química y se origina principalmente en la generación del hidrógeno requerido para el proceso Haber-Bosch, representando aproximadamente el 80 por ciento de dichas emisiones.

El amoníaco (NH₃) es un compuesto químico compuesto por nitrógeno e hidrógeno con una amplia aplicación en la fabricación de fertilizantes y productos químicos industriales. En la actualidad, la producción de amoníaco se realiza mayoritariamente a partir de gas natural, un proceso que resulta en la emisión de aproximadamente 2 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) por cada tonelada de amoníaco producido. Esta particularidad ha llevado a denominar al amoníaco obtenido mediante este método como "amoníaco gris". El mercado global de amoníaco posee un volumen estimado de alrededor de 185 millones de toneladas. Aproximadamente el 90 % de esta producción se encuentra destinada al consumo interno en industrias que emplean el amoníaco como materia prima fundamental en sus procesos de fabricación, mientras que el 10% restante se comercializa a nivel internacional.

En contraposición, el amoníaco verde, gracias a su proceso de producción libre de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), anticipa un crecimiento exponencial en su fabricación, lo que potencialmente conducirá a la sustitución gradual del amoníaco gris y permitirá explorar nuevas oportunidades de aplicaciones adicionales para este recurso.



Fuente: Extraído de Yara - Green fertilizers: everything you need to know

El amoníaco verde impulsa la producción de fertilizantes neutros en carbono. Eso ayuda a descarbonizar la cadena de valor alimentaria. Y con el tiempo, el amoníaco verde podría ser la solución al combustible marítimo neutro para el clima. Esto se debe a que el amoníaco y el hidrógeno son los dos únicos combustibles libres de carbono, lo que significa que no producen emisiones de carbono cuando se queman. Además, el amoníaco verde no requiere combustibles fósiles para su fabricación. En cambio, depende de fuentes de energía renovables como la energía solar, las turbinas eólicas y la hidroelectricidad.

La urea, un agente fertilizante de amplia utilización en nuestro territorio, se aplica de manera prácticamente universal en la agricultura. Actualmente, Uruguay efectúa importaciones anuales de aproximadamente 332 mil toneladas de urea, representando un desembolso financiero de alrededor de U\$S 152 millones, con un costo medio de 458 dólares estadounidenses por tonelada. No obstante, este nivel de consumo conlleva la emisión de alrededor de 167 mil toneladas anuales de dióxido de carbono (CO_2) como consecuencia de dicha importación.

En este contexto, el programa denominado "Futuros Líderes Energéticos" del Consejo Mundial de la Energía en Uruguay ha llevado a cabo un análisis técnico que examina la posibilidad de producir urea a través de un enfoque basado en el hidrógeno verde, lo que se conoce como "urea verde". A continuación, se resaltan algunas de las conclusiones principales extraídas de dicho estudio.

Uruguay podría encontrar un importante potencial de crecimiento a largo plazo en el mercado local, regional e internacional de urea y amoníaco, mediante la producción de "urea verde" a partir de hidrógeno verde. En la actualidad, Uruguay importa una gran cantidad de urea, lo que conlleva altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂). La urea se produce tradicionalmente a partir de amoníaco y CO₂, y el amoníaco se obtiene principalmente del gas natural, un proceso que emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Sin embargo, Uruguay cuenta con condiciones favorables para producir hidrógeno verde a partir de fuentes renovables, como la energía eólica y solar, y también tiene acceso a CO₂ biogénico de la industria forestal y de biocombustibles.

Además de reducir las emisiones de CO₂, la producción de urea verde podría ofrecer ventajas económicas al país. El precio del gas natural, que es un componente clave en la producción de amoníaco y urea convencional, ha experimentado un aumento significativo debido a eventos globales recientes. La producción local de urea verde podría ayudar a estabilizar los precios y reducir la dependencia de los mercados internacionales.

En resumen, Uruguay tiene la oportunidad de desarrollar una industria más sostenible de urea y amoníaco mediante la producción de urea verde, lo que podría tener beneficios tanto ambientales como económicos, así como posibilidades en los mercados locales, regionales e internacionales. Esta iniciativa se alinea con los esfuerzos globales para descarbonizar las economías y puede contribuir a la segunda transición energética exitosa del país.

Ruta estratégica

Políticas

El hidrógeno ha sido utilizado como materia prima en varios sectores claves de la industria durante décadas. En la transición energética, el hidrógeno podría ser el "vector faltante" que ayuda a suministrar grandes cantidades de energía renovable a sectores que de otra manera serían difíciles de descarbonizar a través de la electrificación directa, como el transporte, la industria y los usos actuales de gas natural.

En este sentido, la conversión de energía a hidrógeno puede proporcionar parte de la flexibilidad adicional necesaria para adaptarse a la gran cantidad de energía renovable variable (VRE, por sus siglas en inglés) que se espera que se integre en las décadas venideras.

Las tecnologías están listas. Ahora se necesita una veloz adaptación para lograr las reducciones de costos necesarias y garantizar la viabilidad económica del hidrógeno como facilitador a largo plazo de la transición energética.

Los esfuerzos iniciales podrían centrarse en aplicaciones a gran escala que sean capaces de generar rápidamente economías de escala, con requisitos mínimos de infraestructura, y en sectores donde el hidrógeno proveniente de fuentes renovables se destaque como la opción más eficiente para alcanzar los objetivos climáticos: industrias de gran tamaño (refinerías, instalaciones químicas, producción de metanol) y transporte pesado (flotas de autobuses de hidrógeno, camiones, trenes en líneas no electrificadas, transporte marítimo, etc.).

Para lograr una rápida ampliación, se requeriría un marco de políticas estable y favorable que fomente las inversiones privadas adecuadas. Esto es aplicable a toda la cadena de suministro (fabricantes de equipos, operadores de infraestructura, fabricantes de vehículos, etc.).

Los instrumentos tecnológicamente neutros dirigidos a los consumidores finales pueden impulsar la demanda de hidrógeno y justificar la inversión en infraestructura. Estos instrumentos pueden incluir la fijación de precios del carbono, restricciones de emisiones (zonas de bajas emisiones, estándares o metas de emisiones), mandatos específicos para el contenido de energía renovable o la fijación de precios del carbono en los sectores objetivo.

En el corto plazo, se necesitan medidas que puedan cubrir parcialmente la diferencia de costos iniciales con las tecnologías ya establecidas. Esto es especialmente relevante para las aplicaciones de vehículos (FCEVs) e inversiones en infraestructura. Dichas medidas (subsidios de inversión, reembolsos de impuestos) podrían dirigirse a tecnologías y segmentos prioritarios, con una trayectoria clara de eliminación gradual.

Esto es crucial y transita de la mano con las propuestas iniciales del trabajo, es necesario un trabajo coordinado del sector público y privado del país, en vistas de dar el puntapié inicial en las primeras aplicaciones de hidrógeno en sector como el transporte, en rubros de minimización de costos.

Se necesitarán instrumentos específicos para reducir el riesgo de inversión en infraestructura y mejorar la economía de la cadena de suministro.

Por ejemplo, el acceso a ingresos acumulados de los mercados de energía, servicios energéticos y carbono podría considerarse como un elemento importante para lograr la viabilidad de la inversión en infraestructura a corto plazo, al mismo tiempo que se ajusta por completo a la visión a largo plazo del papel del hidrógeno en la transición energética. Se requerirá una inversión significativa en infraestructura para abastecer aplicaciones finales con hidrógeno producido a partir de fuentes renovables.

Además, la creación de tarifas para la inyección de hidrógeno en la red de gas puede resultar fundamental para generar suficiente demanda en un corto período de tiempo y así impulsar reducciones de costos mediante economías de escala y disminuir los riesgos de las inversiones iniciales en electrolizadores a gran escala para abastecer a la movilidad o la industria como aplicación principal. La inyección de hidrógeno en la red de gas puede representar una capa adicional de ingresos junto a esas aplicaciones principales.

En el ámbito de producción, la plena explotación de la capacidad de generación renovable para la producción de hidrógeno podría ser facilitada mediante la promoción de la certificación de hidrógeno proveniente de energía renovable.

Los esquemas de certificación podrían ayudar a registrar el uso de esa energía (cuando está conectada a la red) y destacar aún más el valor agregado sistémico de los electrolizadores.

El acceso a electricidad en bajos precios seguirá siendo fundamental para garantizar un precio competitivo del hidrógeno para los usuarios finales. Los esquemas de garantía de origen serán instrumentales para asegurar la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental de manera simultánea.

La instalación de infraestructura de producción de hidrógeno donde los precios nodales de electricidad son más bajos, por ejemplo, cerca de generación solar y eólica abundante y aguas arriba de líneas de transmisión congestionadas, podría ser una estrategia para aliviar las restricciones de la red y proporcionar la flexibilidad requerida al sistema. Esto complementa la producción descentralizada de instalaciones dedicadas de energías renovables.

En primer lugar, este modelo requiere precios extremadamente bajos de energía renovable, como los que se encuentran en el Medio Oriente, el Norte de África, México, Chile, Australia, el Mar del Norte, etc.

En segundo lugar, se necesitan economías de escala (por ejemplo, cientos de megavatios a gigavatios) para reducir el costo de producción del hidrógeno.

En tercer lugar, es necesario asegurar clientes locales en la cadena de suministro (grandes industrias o despliegue a gran escala de movilidad) desde el principio, con acuerdos contractuales a largo plazo para disminuir el riesgo de inversión.

En el mediano y largo plazo, en una fase de expansión, se pueden considerar las exportaciones al extranjero hacia países consumidores de hidrógeno con un potencial limitado de energía renovable de bajo costo.

Además, se necesita una inversión continua en investigación, desarrollo e implementación para seguir reduciendo los costos y mejorar la eficiencia general del sistema, lo que a su vez ayudará a reducir el costo del hidrógeno para los usuarios finales. Se requieren proyectos piloto y de demostración con visión de despliegue completo para obtener más experiencia en situaciones de la vida real con variables tecnológicas, económicas y regulatorias. Más investigaciones y demostraciones en el área de electrolizadores de alta eficiencia y flexibilidad podrían llevar a avances que permitirían mayores reducciones en el costo nivelado de hidrógeno.

Finalmente, el papel del hidrógeno de fuentes renovables debe ser considerado como parte de la amplia transición energética global. Esto implica integrar el hidrógeno en escenarios de descarbonización y considerarlo como una opción en modelos de sistemas de energía.

Iniciativas estratégicas

1. Desarrollar habilidades en empresas, instituciones y organizaciones al mismo tiempo que se fomenta la innovación tecnológica y productiva.

En el proceso de expansión de una nueva industria, como la del hidrógeno verde, los períodos de innovación suelen ser rápidos y las mejoras en cada generación de

soluciones son especialmente notables en comparación con una industria consolidada.

Es por esto que diversos programas gubernamentales se centran en estimular la creación de empresas y ecosistemas de innovación que puedan mantener su competitividad y capacidad de crecimiento a largo plazo.

Un ejemplo ilustrativo de este enfoque es el caso de China e India, donde se implementaron políticas públicas destinadas a respaldar inicialmente el desarrollo de capacidades en la fabricación de componentes y equipos de baja complejidad en las industrias solares y eólicas. Esta estrategia resultó en el surgimiento de proveedores especializados en productos de mayor complejidad en estas áreas (Surana et al., 2020; Ladislaw et al., 2021).

2. Evaluar la aplicación de fondos públicos hacia un criterio como destino a las organizaciones privadas.

Aunque la tendencia anterior menciona la importancia de crear habilidades organizativas para el progreso y la innovación, también es esencial que los programas gubernamentales dirigidos a este propósito respalden a empresas e instituciones que demuestren una alta capacidad de ejecución y un historial exitoso en su campo.

Esto permite que la financiación pública se destine directamente a cubrir las brechas de costo e inversión, acelerando así la obtención de resultados y protegiendo la competitividad de la solución y de los desarrolladores.

De esta manera, se evita destinar una parte significativa del financiamiento y del tiempo de ejecución en la generación de capacidades fundamentales. Es importante destacar que esta tendencia no excluye el apoyo a nuevas empresas, ya que en estos casos se pueden evaluar la experiencia, las conexiones y las habilidades de los fundadores y patrocinadores con el mismo objetivo.

3. Direccionar las inversiones hacia una “resolución de desafíos” , no exclusivamente a un nicho tecnológico específico.

Permite reducir el riesgo de seleccionar erróneamente a los "ganadores" que podrían ser superados en un nuevo ciclo acelerado de innovación, ya sea en el mismo país o en otros, debido a la aparición de soluciones más óptimas.

En general, los programas de innovación de los países líderes en tecnología de hidrógeno financian el desarrollo de varias soluciones dentro del mismo desafío, en

lugar de financiar soluciones únicas para diferentes desafíos. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de impulsar programas de apoyo a la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) específicos para los desafíos particulares de la industria del hidrógeno, en lugar de programas transversales para tecnologías limpias. Esto se debe a la necesidad de escalar esta industria a corto plazo y a la naturaleza única de sus desafíos (OCDE, 2022).

Por ejemplo, Alemania financió tres consorcios enfocados en los siguientes desafíos:

- i) lograr la producción a gran escala de electrolizadores;
- ii) producir hidrógeno verde y sus derivados en parques eólicos marinos;
- iii) desarrollar y escalar nuevas tecnologías de transporte para distancias cortas y medias

(S&P Global, 2021).

4. Enfocar esfuerzos y herramientas a la evolución tecnológica y a la industria manufactura.

Los gobiernos están respaldando de forma prioritaria el progreso tecnológico y la capacidad de fabricación en la cadena de valor del hidrógeno limpio. Debido a la necesidad de impulsar la industria en un corto plazo, considerando que varias tecnologías aún no están completamente desarrolladas tanto técnicamente como comercialmente, y que diferentes países poseen capacidades especializadas distintas, los programas de apoyo gubernamentales se enfocan en las prioridades de desarrollo de las industrias locales de producción, utilización y exportación correspondientes.

Por ejemplo, en el Reino Unido se pretende fortalecer las capacidades de producción en seis categorías de productos (válvulas de presión y cierre; materiales de tuberías ; testeo de materiales; stacks de electrólisis; compresores, y celdas de combustible para aplicaciones móviles (Wood y Optimat, 2022)), además del hidrógeno.

Aunque esta lista es amplia, refleja una priorización que guía los esfuerzos de desarrollo. La literatura académica respalda esta tendencia al afirmar que respaldar la investigación, el desarrollo y la innovación en un subsector específico antes de que el mercado global haya madurado aumenta la competitividad de los fabricantes nacionales y contribuye al crecimiento de la industria local (Nuñez-Jimenes et al., 2022).

5. Incentivar un mayor volumen y magnitud de desarrollos en tecnologías.

Enfrentar la trayectoria de reducción de costos y mejora del rendimiento de las tecnologías energéticas emergentes puede requerir dos enfoques principales.

El primero implica aumentar el tamaño de las unidades cuando estas tecnologías se benefician de economías de escala significativas, como en el caso de las plantas de electrólisis.

El segundo enfoque implica la expansión del número de unidades desplegadas, especialmente en el caso de tecnologías que se propagan por difusión, como los vehículos con celdas de combustible. En este último caso, la experimentación y la implementación simultánea de diversas iniciativas respaldadas permiten a la industria aprender a través de los fracasos tempranos y mitigar los riesgos asociados con el respaldo de soluciones o equipos específicos a través de la diversificación (Wilson, 2012).

Ruta de propuestas

Enriquecimiento de las capacidades:

Potenciar las habilidades locales en ingeniería, instalación, operación, mantenimiento y certificación de equipos e instalaciones en toda la cadena de valor del hidrógeno aprovecharía el talento disponible en el país y satisfaría las necesidades de la industria nacional.

El desarrollo de estos servicios aceleraría la planificación y la implementación de proyectos, capturaría una parte significativa de su valor y abriría la posibilidad de exportar servicios en el futuro a la región.

Uruguay se destaca como uno de los países más avanzados en el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en América Latina y enfrenta desafíos similares a los de las naciones industrializadas en términos de integración tecnológica de diversos equipos y sistemas. Al impulsar capacidades tempranas en el ámbito de los servicios técnicos, se promovería la creación no solo de empresas especializadas en diseño, integración e implementación, sino también de productos como software y sistemas pre-integrados.

Centralizar el valor:

La creación o respaldo de un centro tecnológico altamente especializado en la cadena de valor del hidrógeno verde congregará a actores destacados de la

industria y la academia, tanto a nivel local como internacional. Este enfoque posibilitará abordar las necesidades internas y fomentar la integración tecnológica.

El éxito de dicho centro no solo dependerá de la disponibilidad de financiamiento para los proyectos, sino también de la capacidad para ofrecer servicios especializados que impulsen el desarrollo de tecnología. Estos servicios deberían incluir capacidades de prueba, como la implementación de bancos de pruebas; servicios de medición, como laboratorios de muestreo; y servicios de certificación, tanto para equipos y sistemas como para profesionales técnicos.

La existencia de algunos o todos estos servicios resulta fundamental para reducir las barreras a las que se enfrentan los desarrolladores de tecnología. La cantidad y ubicación estratégica de los centros deberán ser determinadas de manera estratégica.

Difusión de la estrategia:

Fomentar la instauración temprana y ampliamente difundida de una variedad de iniciativas empresariales destinadas a poner a prueba las soluciones tecnológicas en el ámbito del hidrógeno verde, contribuirá significativamente a la mitigación de los riesgos inherentes tanto desde el punto de vista tecnológico como comercial, al tiempo que propiciará una aceleración del proceso de adquisición de conocimientos en el conjunto de la industria.

Concretamente, focalizar la atención en tecnologías móviles, tales como una variedad de vehículos y estaciones de recarga, además de aplicaciones industriales ligeras como grúas horquilla o pequeñas unidades de generación de calor, generará oportunidades sustanciales para diversificar y explorar diversas vertientes. La iniciativa de lanzar numerosos proyectos a una escala reducida presenta la ventaja de costos relativamente moderados, y al mismo tiempo, promueve el desarrollo de cadenas de suministro, la identificación de dinámicas de precios y deficiencias de innovación específicas en el mercado, y estimula la difusión tecnológica que, a su vez, impulsa la adopción generalizada de estas tecnologías.

Adicionalmente, la ejecución de este despliegue conlleva una aceleración en el desarrollo de marcos regulatorios, sistemas de certificación y servicios correlacionados. Con el propósito de respaldar la implementación de estas medidas, es factible explorar diversas opciones en consonancia con los recursos disponibles. Entre las alternativas viables destacan los subsidios dirigidos a inversiones y operaciones, los cuales facilitarán a los entes privados a sortear las disparidades de costos en comparación con las soluciones de carácter fósil ya arraigadas en el mercado. Asimismo, cabe la posibilidad de establecer incentivos fiscales orientados a estimular la adopción de tecnologías actualizadas en este ámbito.

La provisión de infraestructura de acceso público, como estaciones de recarga de hidrógeno destinadas a vehículos, se erige como un elemento facilitador para la adopción a nivel regional. Adicionalmente, la prestación de asistencia técnica y la adquisición de equipos y sistemas relacionados con el hidrógeno verde por parte de entidades gubernamentales representan opciones sumamente valiosas con el propósito de apoyar el proceso de implementación y catalizar la transición hacia una economía fundamentada en el hidrógeno verde.

Ámbito internacional:

Fomentar la atracción de empresas de alcance internacional con miras a establecer instalaciones de fabricación de vanguardia a largo plazo en Uruguay podría catalizar la creación de centros de excelencia que añadirían un valor significativamente mayor a la cadena de producción del hidrógeno verde. Simultáneamente, este impulso propiciaría el estímulo de la innovación y la expansión de nuevos productos y servicios dentro de dicha cadena.

Se podría incitar o movilizar a estos actores a establecer alianzas estratégicas con compañías locales, con el propósito de promover la transferencia de conocimientos y competencias, incluso considerando esta colaboración como un requisito para acceder a cierto respaldo público.

En particular, se podría canalizar la inversión en dos áreas críticas para alcanzar este objetivo en Uruguay:

i) la integración de sistemas de electrólisis con pilas de electrólisis, con un enfoque principal en la tecnología PEM (aunque sin descartar otras alternativas), y ii) la fabricación de rectificadores e inversores. La creación de capacidad para producir estos dispositivos a nivel local permitiría superar posibles obstáculos en las cadenas de suministro internacionales en las próximas décadas, aprovechando además la ventaja comparativa relativa en el Espacio de Productos, en contraposición a equipos y sistemas más complejos que podrían plantear mayores desafíos para su producción.

En la literatura especializada sobre política industrial, se han identificado diversas estrategias para atraer este tipo de empresas y capacidades. Actualmente, se debaten especialmente dos enfoques en la industria y en el ámbito académico con el fin de impulsar la inversión en manufactura e innovación en sectores emergentes:

i) incentivos directos, que pueden tomar la forma de subsidios a la inversión o beneficios fiscales, y

ii) requisitos de contenido local, los cuales a menudo se establecen como condiciones para participar en licitaciones reguladas o para acceder a apoyo público.

Conclusión

Tal y como hemos podido comprobar a lo largo del trabajo de análisis, el Hidrógeno verde despierta en Uruguay un amplio abanico de oportunidades. Partiendo de la base que el país posee en sus raíces una estructura de recursos renovables de calidad, los cuales son encontrados en abundancia y con margen de complementariedad.

En vistas de esto Uruguay debe enfocar sus esfuerzos en la producción de H₂ verde y todo los derivados provenientes del elemento. Existen las condiciones dadas para que la producción del mismo sea a costos competitivos internacionalmente (similares al caso chileno). Por ende se encuentra en las manos del país, la elaboración de una estructura idónea, un ecosistema amigable que procure del desarrollo del hidrógeno en costos competitivos. Junto a ellos, los principales actores del gobierno, sector público y privado, deben transitar por dicho sendero de manera coordinada, mediante políticas públicas, incentivos impositivos, exoneraciones inteligentes que estén direccionados hacia un ambiente confiable para los inversores.

Es una oportunidad para avanzar sobre el vector energético del país, continuando con la transformación de la matriz energética que tiene como principal objetivo la descarbonización.

Competitivamente, Uruguay se encuentra en condiciones favorables en escenarios de demanda. Estimaciones implican que el mercado de exportación ronda las cifras de 1.300 millones de dólares. Por lo tanto, sacar provecho de estas ventanas de oportunidad depende un desarrollo estratégico nacional, estructurando una visión a largo plazo, con líneas de trabajo coordinadas y que trascienden el gobierno de turno. Se debe abocar los esfuerzos en la generación de infraestructura adecuada, potencial el capital humano, la investigación, mejoramiento del acceso de financiamiento, integración regional y cooperación internacional.

Gracias al Hidrógeno, el país seguirá transitando hacia la mitigación de la carbonización, sin perder en vistas las inmensas oportunidades que despierta el H₂. Generando un crecimiento sustentable dentro del rubro y avanzando competitivamente para lograr ser un modelo a seguir en la región Sudamérica.

Referencias

- **Alianza Clima Desarrollo.** “Hidrógeno verde, la energía del futuro en América Latina?” *Hidrógeno verde, la energía del futuro en América Latina?*, 2021. Accessed 2023.
- **AMMPOWER.** “Green Ammonia: A Better Way to Make Fertilizer.” 2022. Accessed 2022.
- **Bartlett, John.** “CHILE APUESTA AL HIDRÓGENO VERDE.” *CHILE APUESTA AL HIDRÓGENO VERDE*, 2022. Accessed 2023.
- **BID.** *El futuro del hidrógeno verde: una tremenda oportunidad para América Latina y el Caribe*, 2021. Accessed 2023.
- **BID.** “Hoja de Ruta Colombia.” *Hoja de Ruta Colombia*, 2022. Accessed 2023.
- **BID.** “Programa Nacional de Hidrógeno Hoja de Ruta Brasil.” *Programa Nacional de Hidrógeno Hoja de Ruta Brasil*, 2021. Accessed 2023.
- **GIZ.** “Estado del Hidrógeno Verde en América Latina.” *Estado del Hidrógeno Verde en América Latina*, 2022. Accessed 2023.
- **Gobierno de Chile.** *Condiciones y Oportunidades para el Comercio de H₂ Chile, Alemania y Japón*, 2022. Accessed 2023.
- **Gobierno de Chile.** “Estrategia Hidrógeno Verde en Chile.” *Estrategia Hidrógeno Verde en Chile*, 2020. Accessed 2023.
- **Gonzales, Joaquin, et al.** *Producción de metanol a partir de H₂ verde y CO₂*. 2020. Accessed 2023.
- *Green hydrogen policies and technology costs*, 2021. Accessed 2023.
- **Guerra, Carlos, and Lorenzo Reyes-Bozo.** *El hidrógeno como vector energético (2020)*, Accessed 2023.
- **H₂ Perú.** *Recomendaciones para Hoja de Ruta Perú*, 2022. Accessed 2023.
- **Holter, Birgitte.** *Green fertilizers: everything you need to know*. 2022. Accessed 2023.

- **Hychico.** *Hacia la Producción de Hidrógeno Verde en Patagonia*, 2021. Accessed 2023.
- **IBERDROLA.** Green hydrogen: an alternative that reduces emissions and cares for our planet. 2022. Accessed 2023.
- **ICEX - Embajada España Colombia.** *Informe de Feria: Congreso de Hidrógeno para América Latina y Caribe*, 2022. Accessed 2023.
- **IEA.** *Global Hydrogen Review 2022*, 2022. Accessed 2023.
- *Insumos para la elaboración de Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde para Uruguay.* Accessed 2022.
- **IRENA.** *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Green Hydrogen Cost and Potential*, 2022. Accessed 2023.
- **IRENA.** *Green hydrogen: a key enabler to broaden the potential of renewable power solutions in hard-to-abate sectors*, 2023. Accessed 2023.
- **IRENA.** "Green hydrogen cost reduction." *Green hydrogen cost reduction*, 2020. Accessed 2020.
- **IRENA.** "Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making." Marzo 2022. Accessed 2023.
- **IRENA.** *PERSPECTIVAS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL*, 2021. Accessed 2023.
- **Jones, Nicola.** "From Fertilizer to Fuel: Can 'Green' Ammonia Be a Climate Fix?" 2022. Accessed 2023.
- **Medina, Noelia, et al.** *Hidrógeno verde: un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización*. 2021. Accessed 2023.
- **Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.** *Estrategia Nacional Hidrógeno Verde*. 2020. Accessed 2023.
- **Ministerio de Industria, Energía y Minería.** *Hoja de ruta del hidrógeno verde en Uruguay*. 2022. Accessed 2023.

- **Ministerio de Industria, Energía y Minería.** *¿Qué es el hidrógeno verde y por qué Uruguay?* 2023. Accessed 2023.
- **Newenergy.** "H₂LAC Índice de Hidrógeno para América Latina." *H₂LAC Índice de Hidrógeno para América Latina*, 2022. Accessed 2023.
- **Reyes-Bozo, Lorenzo.** "Hidrógeno verde piedra angular del futuro energético." *Hidrógeno verde piedra angular del futuro energético*, 2020. Accessed 2023.
- **Torrigo, Blanca, and Gabriel Casaburi.** *Hidrógeno verde en Chile: una herramienta para la descarbonización*. 2022. Accessed 2023.
- **World Bank.** *Hidrógeno Verde: Una solución para la urgencia climática y recuperación económica de Chile*, 2021. Accessed 2023.
- **World Economic Forum.** "What is green hydrogen and why do we need it? An expert explains." *What is green hydrogen and why do we need it? An expert explains*. Accessed 2021.