



CIECTI

Centro Interdisciplinario
de Estudios en Ciencia,
Tecnología e Innovación

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

CIECTI

La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en la cadena de valor del hidrógeno

Resumen del ciclo de encuentros: nuevas tecnologías para la transición energética

Autores:

Baruj, Gustavo (CIECTI)
gbaruj@gmail.com

Zanazzi, Leonardo (CIECTI)
leonardo.zanazzi@gmail.com

ciecti.org.ar



Baruj, Gustavo

La movilidad sustentable : oportunidades y desafíos en la cadena de valor del hidrógeno : resumen del ciclo de encuentros : nuevas tecnologías para la transición energética / Gustavo Baruj ; Leonardo Zanazzi. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CIECTI, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4193-65-0

1. Nuevas Tecnologías. 2. Hidrógeno. 3. Energía Renovable. I. Zanazzi, Leonardo.

II. Título.

CDD 577.13

© 2023 CIECTI

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.

El documento que se desarrolla a continuación está basado en el Ciclo de Encuentros denominado “Nuevas Tecnologías para la Transición Energética. La Movilidad Sustentable: Oportunidades y Desafíos en la Cadena de Valor del Hidrógeno” y tiene por finalidad estilizar los principales aspectos identificados, relacionados con las capacidades existentes, los espacios de oportunidad y/o desafíos que enfrenta el país para sumarse a este nuevo paradigma energético. Los encuentros se llevaron a cabo en el mes de junio de 2021, motivo por el cual el contenido del documento hace referencia a cargos de funcionarios, conformación de equipos e incluso instituciones que, a la fecha de publicación del presente informe, pueden haber sufrido modificaciones.

Índice

Índice.....	3
Introducción.....	5
1. Economía del hidrógeno: la visión estratégica	7
2. Oportunidades y desafíos en la producción de hidrógeno.....	12
Producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua (hidrógeno verde)	14
Proyecto de la provincia de Río Negro - Fraunhofer para producción de hidrógeno verde a partir de la energía eólica y el agua.....	16
Sistemas bioelectroquímicos (BES) para la transformación de aguas residuales en un recurso renovable. Producción de bio-hidrógeno.....	18
Producción del hidrógeno a partir de biomasa (algas).....	20
Tecnologías maduras de producción a gran escala y transformación de hidrógeno gris en azul	21
3. Oportunidades y desafíos en el almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno	24
Tecnologías de almacenamiento del hidrógeno	24
Desarrollos tecnológicos basados en materiales formadores de hidruros del Centro Atómico Bariloche - CNEA y resolución de problemas del laboratorio a la industria	26
Desafíos y normativas para el transporte de hidrógeno	28
Desarrollos de la industria nacional	30
4. Oportunidades y desafíos en la implementación y utilización del hidrógeno en la movilidad	31
Celdas de combustible.....	31
Evolución de los combustibles en el transporte	32
Usos potenciales del hidrógeno en la movilidad y oportunidades	33
Oportunidades en el gas natural (<i>blending</i> de hidrógeno limpio con gas natural)	36
Consortio H2ar – Transporte ferroviario, gas natural e indicadores.....	38
5. Oportunidades y desafíos en la producción y usos industriales del hidrógeno.....	39

Producción y usos del hidrógeno en la industria petroquímica	40
Derivados del hidrógeno en la industria: amoníaco y fertilizantes	42
Hidrógeno verde y bajo en carbono: aportes del INTI hacia el sector productivo	45
Planta experimental de Hidrógeno de Pico Truncado	46
6. En resumen: principales capacidades, potencialidades y desafíos para la Argentina	48
Oportunidades y desafíos en la producción de hidrógeno	48
Oportunidades y desafíos en el almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno	50
Oportunidades y desafíos en la implementación y utilización del hidrógeno en la movilidad	52
Oportunidades y desafíos en la producción y usos industriales del hidrógeno.....	53
Bibliografía	56
Anexo – Listado de expositoras/es del ciclo	58

Introducción

El documento que se desarrolla a continuación está basado en el Ciclo de Encuentros denominado “Nuevas Tecnologías para la Transición Energética. La Movilidad Sustentable: Oportunidades y Desafíos en la Cadena de Valor del Hidrógeno” y tiene por finalidad estilizar los principales aspectos identificados, relacionados con las capacidades existentes, los espacios de oportunidad y/o desafíos que enfrenta el país para sumarse a este nuevo paradigma energético.

El Ciclo fue impulsado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCyT), la Agencia I+D+i y el CONICET, con el apoyo del Ministerio de Desarrollo Productivo (MINPROD); el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MAyDS); la Secretaría de Asuntos Estratégicos (SAE) y la Secretaría de Energía (SE).

Su objetivo fue el de generar un espacio de intercambio desde el cual reflexionar acerca de las capacidades, potencialidades y desafíos con los que cuenta nuestro país, a fin de contribuir con el desarrollo de una cadena de valor competitiva tanto en movilidad eléctrica como en aplicaciones dirigidas a la “descarbonización” de los procesos económicos y productivos a partir del hidrógeno.

El Ciclo se desarrolló en 5 encuentros, todos los miércoles de junio del 2021, que trataron sobre: i) los desafíos de la producción de hidrógeno (H_2); ii) su almacenamiento, transporte y distribución; iii) las potencialidades de uso en la movilidad eléctrica; iv) las potencialidades de usos finales en la industria; y v) aspectos transversales, marco normativo y regulatorio.

En estas reuniones expusieron representantes de la industria, de la ciencia y de quienes desarrollan tecnología en el ámbito público y privado, conjugando la mirada tanto de la nación como de las provincias. Se buscó pensar no solo en la innovación, sino también en la inversión y en los aspectos regulatorios.

Así, entre los expositores se puede mencionar la participación de tres ministros: de Ciencia, Tecnología e Innovación; de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Economía; y más de quince funcionarios de alto nivel a cargo o en representación de diferentes instituciones vinculadas a la temática: Agencia I+D+i; CONICET; Secretaría de Energía; Ministerio de Desarrollo Productivo; Ministerio de Transporte; Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto; Secretaría de Asuntos Estratégicos (SAE); Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI); e YPF Tecnología (Y-TEC).

Unos 25 expertos provenientes de diferentes ámbitos fueron los encargados centrales de exponer acerca de su experiencia y avances verificados en la Argentina y el mundo. Entre ellos: del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF);

Instituto de Investigaciones en Físico-Química de Córdoba (INFIQC); Instituto de Tecnologías del Hidrógeno y Energía Sostenible - ITHES (CONICET-UBA); Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable - IEDS - Sede Bariloche (CNEA); Departamento de Fisicoquímica de Materiales (Centro Atómico Bariloche); Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable - IEDS - Sede Bariloche (CNEA); Centro Atómico Constituyentes (CONICET/CNEA); Laboratorio de Control de Emisiones Gaseosas Vehiculares (LCEGV) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (MAyDS); Centro Nacional de Desarrollo e Innovación Ferroviaria (CENADIF) - Ferrocarriles Argentinos Sociedad del Estado; Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI); Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) – CONICET; Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado; Agencia de Inversiones de la provincia de Río Negro; Instituto Fraunhofer IEE; e Y-TEC. También de empresas como: Air Liquide Argentina S.A.; Galileo Technologies S.A.; Scania Argentina y Toyota, entre otras.

A lo largo del Ciclo de Encuentros, donde se tocaron todos los aspectos vinculados a la cadena de valor del hidrógeno, se reafirmaron algunos aspectos, tales como:

- La problemática ambiental (cambio climático) opera como un gran eje tractor de la transición energética, a la vez que se visualiza a la energía como un elemento estructurador de un nuevo modelo de desarrollo.
- En este marco, el hidrógeno emerge como un vector energético con grandes posibilidades para avanzar aceleradamente hacia la descarbonización de las economías, colaborando en el cumplimiento de los compromisos ambientales
- En efecto, el hidrógeno se destaca por ser un recurso abundante, con una gran capacidad energética, constituir un vector energético potencialmente verde y tener múltiples aplicaciones industriales (petroquímica, refinerías, fertilizantes, alimentos, metales) con un enorme potencial para el transporte.
- El mercado global actual del hidrógeno representa 74 mil millones de toneladas por año, con un crecimiento estimado del 7% anual. Debido a los enormes avances tecnológicos en curso se estima una duplicación de este mercado para el 2050.
- Nuestro sistema científico-tecnológico se revela robusto frente al desafío de generar nuevos desarrollos y capacidades (junto al sector privado), contando con numerosos grupos de investigación en todo el país con probados avances en diferentes aspectos de la temática.
- Argentina posee capacidades para producir hidrógeno de todos los tipos. En particular, se destacó el inmejorable potencial de producción tanto para hidrógeno azul (por ejemplo, utilizando gas de Vaca Muerta), como para el desarrollo de hidrógeno verde, contando con excelentes recursos vinculados a la energía solar y eólica.

- Para la Argentina es central pensarse como productores y no solo usuarios de tecnología. Buscar de qué manera agregaremos valor y podremos producirla.
- La tecnología debería comenzar a visualizarse no solo como artefactos, máquinas, dispositivos o fórmulas, sino como sistemas, donde hay actores y un fuerte desafío en la dinámica de la articulación de esos actores.

En el primer capítulo del documento, a continuación, se resume la mirada estratégica que en relación a la economía del hidrógeno en Argentina aportaron los diferentes funcionarios de alto rango político e institucional que participaron del Ciclo. En el segundo capítulo se avanza en las principales oportunidades y desafíos relacionados con su producción. En el tercer capítulo se sintetizan las problemáticas asociadas con el almacenamiento, el transporte y la distribución del hidrógeno. Posteriormente, el capítulo cuarto resume las principales oportunidades y desafíos relacionados con la implementación y utilización del hidrógeno en la movilidad. El quinto capítulo desarrolla los contenidos asociados a su producción y usos en la industria. Finalmente, en el último apartado se presentan a modo de resumen los principales aspectos relacionados con las capacidades existentes, potencialidades y desafíos que enfrenta la Argentina para sumarse a este nuevo paradigma energético. En el Anexo, se presenta el listado de expositores del Ciclo.

1. Economía del hidrógeno: la visión estratégica

El Ciclo, entre sus aspectos más destacados, reveló con claridad cuál es la mirada estratégica que tienen los diferentes funcionarios de alto rango político e institucional en relación a la economía del hidrógeno en Argentina. En efecto, Fernando Peirano (Presidente de la Agencia I+D+i), uno de los principales impulsores de la iniciativa, lo presentó como una necesaria llamada a la reflexión a las puertas de un cambio de paradigma o una revolución tecnológica que presenta oportunidades, no sólo desde el punto de vista productivo sino también desde una perspectiva del desarrollo en general, en el cual convergen temas de sostenibilidad ambiental, de inclusión social y de desarrollo federal.

Los ministros en funciones al momento de desarrollarse el Ciclo de Encuentros, Roberto Salvarezza (Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva), Martín Guzmán (Economía) y Juan Cabandié (Ambiente y Desarrollo Sostenible), transmitieron los pilares estratégicos sobre los cuales debería construirse tanto la agenda nacional hacia la transición energética, en términos generales, como también el modelo de inserción en la economía global del hidrógeno. Se trata de una agenda de desarrollo que necesariamente deberá

mancomunar crecimiento económico con sostenibilidad ambiental, posicionando a la energía como un elemento estructurador, vertebrador de un nuevo modelo de desarrollo para la Argentina.

Hubo coincidencia en el diagnóstico de que las economías de los países en desarrollo han florecido gracias a la escisión entre ambas esferas, sobre la base de un modelo extractivo que se contrapone con criterios de sostenibilidad ambiental. Argentina, por su parte, si bien pondera su posición de acreedor ambiental, ha asumido compromisos multilaterales en la materia, como lo certifica su temprana adherencia al Acuerdo de París. Más aún, asumiendo que el futuro es “verde”, el país necesita fortalecer una agenda para combatir el cambio climático a conciencia y de modo sostenido. Efectivamente, en palabras de Guzmán, “la sostenibilidad ambiental es un asunto que determinará la estabilidad macroeconómica de Argentina en las próximas décadas”.

Otro de los puntos salientes se corresponde con el papel del conocimiento como motor del crecimiento y dinamismo de las economías en el nuevo paradigma global. Hubo consenso en que las sociedades que se desarrollan son aquellas capaces de aprender y generar conocimiento. El conocimiento se ha vuelto transversal a toda la estructura productiva y es decisivo para alcanzar objetivos de inclusión, agregación de valor y estabilidad económica. De allí la necesidad de generar las condiciones para que la Argentina tenga cada vez mayor capacidad de generar conocimiento.

El conocimiento, le permitirá al país desarrollar e insertarse en los eslabones claves de la cadena del hidrógeno, aquellos de mayor valor agregado, que generan más puestos de trabajo y mejor remunerados, como enfatizara en el Ciclo el Director del CEP (MINPROD). El desarrollo de proveedores constituirá un factor clave para que el país se posicione fundamentalmente como proveedor de tecnologías a nivel global y no sólo de recursos naturales. A tal fin se expresó que la estrategia deberá contemplar un primer paso de creación de un mercado interno del hidrógeno, que potencie la inversión y la creación de capacidades nacionales.

En este sentido, los ministros enfatizaron en el rol de la política científico tecnológica en particular. Salvarezza destacó los esfuerzos del Gobierno Nacional en esta dirección, por vigorizar la vinculación de los organismos de ciencia y tecnología (OCT) y las universidades con el sector productivo, clave para el agregado de valor.

Un ejemplo de ello, retomado también por la Presidenta del CONICET Ana Franchi, lo constituye el Consorcio H2ar creado por Y-TEC y que nuclea a más de 40 empresas de toda la cadena de valor del hidrógeno. El Consorcio H2ar constituye también un ejemplo de articulación y coordinación institucional y empresarial (público – privado), la cual fue considerada un tema central para la inserción inteligente y temprana de la Argentina en la economía global del hidrógeno.

Otro ejemplo se encuentra en la labor del Gobierno Nacional en la construcción de consensos a nivel nacional e internacional. Entre los primeros, se destaca la conformación del Consejo Económico y Social (CES) como espacio de diálogo que contribuye en la articulación de reglas de juego para todos los actores relevantes de diferentes cadenas, entre ellos la del hidrógeno. A nivel internacional, la articulación se presenta en diferentes formatos y atendiendo a diferentes objetivos, siendo el de financiamiento con organismos multilaterales de crédito el más enfatizado por los ministros.

El financiamiento es clave en un sector intensivo en capital. De acuerdo con estimaciones del CEP (MINPROD), las necesidades de financiamiento para el sector de aquí al año 2050 ascienden a 100.000 millones de dólares. El crédito internacional juega un rol fundamental, en particular el proveniente de los organismos y bancos multilaterales que, de acuerdo con lo expuesto por Guzmán, deben ser modernizados ajustándose al horizonte temporal que presentan estos desafíos de largo plazo y a tasas accesibles para los países en vías de desarrollo. Los ministros también coincidieron en los límites al crecimiento y la necesidad de generación de dólares que supone la deuda externa del país. En este sentido, Cabandié destacó la calidad de acreedor ambiental del país, oportunidad que abre el desafío de impulsar modalidades innovadoras que posibiliten canjear deuda por acciones ambientales, que operen como mecanismos de compensación productiva.

A nivel de financiamiento en el ámbito del sistema nacional de ciencia y tecnología, se destacó que la Agencia de I+D+i, con proyectos específicos, y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, con proyectos interinstitucionales, realizarán aportes, y se espera que en el futuro el Consorcio H2ar también pueda dinamizar y canalizar financiamiento para el sector. Desde la Agencia I+D+i, se destacó el pronto lanzamiento de una convocatoria de unos 700 millones de pesos, que se espera accione nuevos proyectos, dinamice la vinculación del sector con diferentes fuentes de financiamiento y potencie mayores inversiones en el sector.

También se coincidió en que el Estado deberá jugar un rol muy activo, para promover una estrategia que posicione al país como un jugador de peso en la economía global del hidrógeno. La política científico-tecnológica, el acceso al crédito, el posicionamiento estratégico en eslabones clave de la cadena global de valor, la inversión en infraestructura, los aspectos normativos y la estabilidad macroeconómica, constituyen aspectos clave para el éxito de la estrategia, que requieren del impulso y la coordinación de los organismos del Estado.

En esta línea, diferentes expositores (SAE, INTI, Ministerio de Relaciones Exteriores e Y-TEC), presentaron una síntesis en torno al desafío de la economía del hidrógeno para el país y las estrategias de inserción internacional llevadas a cabo por el Estado Nacional. De este modo, se destacaron esfuerzos en materia de articulación interministerial en espacios

de trabajo en los que convergen el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, el CONICET; Y-TEC, la Agencia I+D+i, el Ministerios de Relaciones Exteriores, el Ministerio de Transporte, el Ministerio de Economía y la Secretaría de Energía, con el acompañamiento del sector privado, bajo una consigna muy clara, posicionar a la Argentina en el mapa internacional del hidrógeno.

Estas instituciones comparten la visión de un modelo de desarrollo que busca aprovechar las oportunidades en nuevos segmentos de la economía vinculada a la transición energética, y que en Argentina vincula conceptos tales como producción, exportación, compromiso ambiental, inversiones y desarrollo tecnológico-productivo. Argentina cuenta con oportunidades para la producción a gran escala de hidrógeno verde gracias a sus condiciones naturales para la producción rentable de energía fotovoltaica y eólica. Sin embargo, también se plantea una transición más abarcativa, avanzando en paralelo en la promoción de un mercado doméstico para el hidrógeno azul sobre la base de las reservas de gas natural con las que cuenta el país.

Se destacó también la experiencia que posee el país en la economía del hidrógeno a raíz de algunos hitos clave, como la Ley de Promoción del año 2006 y la temprana experiencia de producción de hidrógeno verde de la empresa Hychico en el 2009. Es decir, el país cuenta con potencial y con experiencia. También una visión compartida público-privada de un modelo de desarrollo que debe llevarse adelante con ciencia y tecnología propia en el marco de un compromiso ambiental que ha sido refrendado con la reciente creación del Gabinete Nacional de Cambio Climático. Y también la voluntad de establecer alianzas con países específicos para potenciar la curva de aprendizaje y acceder a inversiones extranjeras y fuentes de financiamiento internacional.

En este último punto Cancillería ha sido clave. Más precisamente, desde la Subsecretaría de Negociaciones Económicas Multilaterales y Bilaterales se detalló que hace más de un año y medio ya que tienen la temática del hidrógeno jerarquizada en su agenda de trabajo, con la misión de posicionar a la Argentina en el mapa internacional del hidrógeno. Lo cual se traduce en su activa participación y acompañamiento en la mesa nacional del hidrógeno, en conjunto con la SAE, y oficiar de nexo con el resto del mundo.

Las modalidades de vinculación impulsadas se dividen, a grandes rasgos, entre aquellas que hacen a las vinculaciones multilaterales y a las bilaterales. En ambos casos la agenda se revela muy activa, destacándose entre las multilaterales la participación de Argentina en la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y en lo específico al hidrógeno, en el análisis sobre las posibilidades de incorporación del país a distintas organizaciones internacionales. En cuanto a la agenda de cooperación bilateral por hidrógeno, se destaca el Memorando de Entendimiento firmado con Japón en el año 2009 (actualmente en negociaciones por otro vinculado al amoníaco), otro en proceso de

negociación con Alemania y actividades vinculadas al hidrógeno en diferentes Embajadas de la Argentina en el mundo (por ejemplo, el caso de Corea del Sur). También se destacan los capítulos específicos al hidrógeno en las comisiones económicas.

Finalmente, desde Y-TEC, se destacó la multiplicidad de aplicaciones y oportunidades que supone el hidrógeno en el marco de un necesario cambio en la matriz energética y los consiguientes múltiples desafíos de carácter estratégico y operativos involucrados. En este contexto se presentó el Consorcio H2ar. Creado en agosto del año 2020, representa un espacio de trabajo colaborativo de empresas que actúan o están interesadas en la cadena de valor del hidrógeno (desde la producción hasta la aplicación).

A la fecha, del Consorcio participan 43 compañías que pertenecen a diversos mercados: automotrices, movilidad de pesados, maquinaria y buses; generadoras de energía eléctrica; transportadoras y distribuidoras de gas natural; refinadoras de petróleo; productoras y consumidoras de hidrógeno en Argentina; grandes consumidores de energía; y otras empresas de tecnología y energía. En fuerte articulación con el CES (Consejo Económico y Social), la Secretaría de Asuntos Estratégicos (SAE), el MINCyT, el Ministerio de Producción, la Secretaría de Energía y el INTI, entre otras instituciones, el objetivo del Consorcio es:

- Consolidar una visión común a mediano y largo plazo que permita alinear los esfuerzos y reducir la incertidumbre de la implementación de nuevas tecnologías y oportunidades de negocio.
- Promover pilotos que definan eficiencias, costos y operación de cada una de las soluciones propuestas y dar señales de inversión que activen el mercado.
- Generar estrategias en los distintos campos de aplicación que identifiquen desafíos e impulsen el desarrollo de capacidades tecnológicas y productivas locales en forma asociativa.

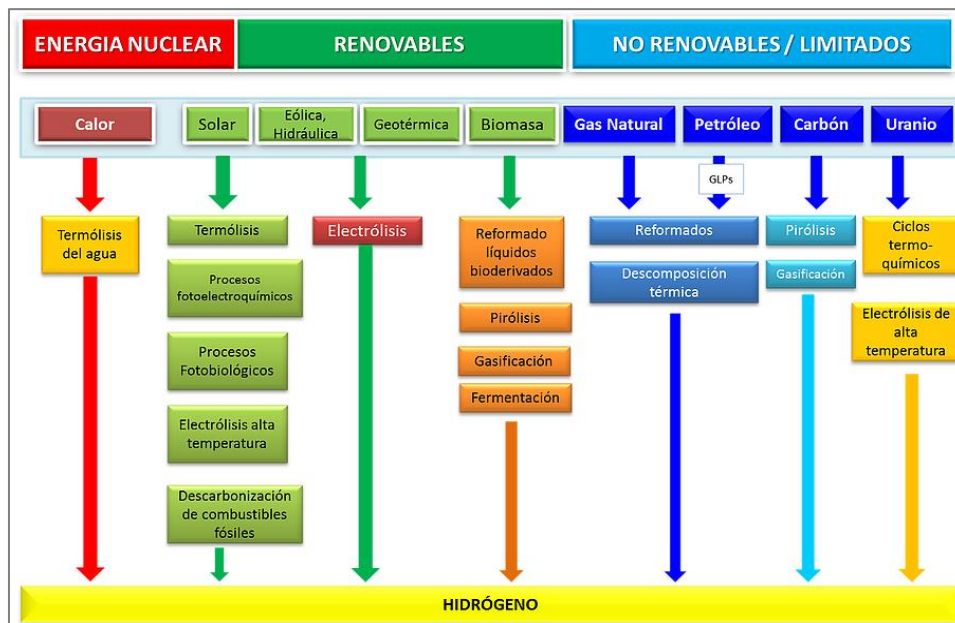
Así, el consorcio lleva a cabo una serie de acciones colaborativas orientadas a propósitos tales como alinear marcos normativos e incentivos en pos de una visión común (en conjunto con el CES), generar indicadores clave para el sector, e impulsar estudios técnico económicos específicos, en muchos casos en conjunto con el MIINCyT. Entre estos estudios, que son de mediano y largo plazo, se destaca un proyecto insignia denominado H2ARMONNIA para la producción de amoníaco en Bahía Blanca y que tendría como uno de sus objetivos posicionar a la Argentina en el mercado internacional a partir de una iniciativa de gran escala. En general, el impulso de experiencias piloto forma parte la cartera permanente de iniciativas del Consorcio, como así también la definición de marcos regulatorios en conjunto con el INTI.

2. Oportunidades y desafíos en la producción de hidrógeno

En el actual contexto de transición energética hacia alternativas más limpias, el hidrógeno ofrece diferentes alternativas de descarbonización. Es versátil, se puede generar a partir de una variedad de recursos y tiene numerosos usos. Asimismo, posee un gran potencial en la búsqueda de una mayor participación de las energías renovables en la matriz energética.

De este modo, cuando se analiza la etapa de producción del hidrógeno, es importante considerar las materias primas que se utilizan en el proceso. Tanto en relación a las fuentes energéticas, que se dividen en no renovables: gas natural, petróleo, carbón y las renovables: solar, eólica, etc., así como también mediante qué procesos y/o tecnologías es producido.

Gráfico 1. Producción de hidrógeno – Principales fuentes



Fuente: Dieuzeide, M. L. (2021).

En la actualidad el hidrógeno se produce mayoritariamente a partir de gas natural y carbón, siendo las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociadas a esta producción en el mundo equivalentes al total de emisiones combinadas de países como Reino Unido e Indonesia. En efecto, la tecnología más difundida y madura es el reformado de metano que, teniendo la ventaja de la gran escala, emite CO_2 a la atmósfera y produce el denominado hidrógeno gris. Sin embargo, mediante la incorporación de tecnologías de captura de este carbono se produce un hidrógeno ambientalmente más amigable que se denomina hidrógeno azul.

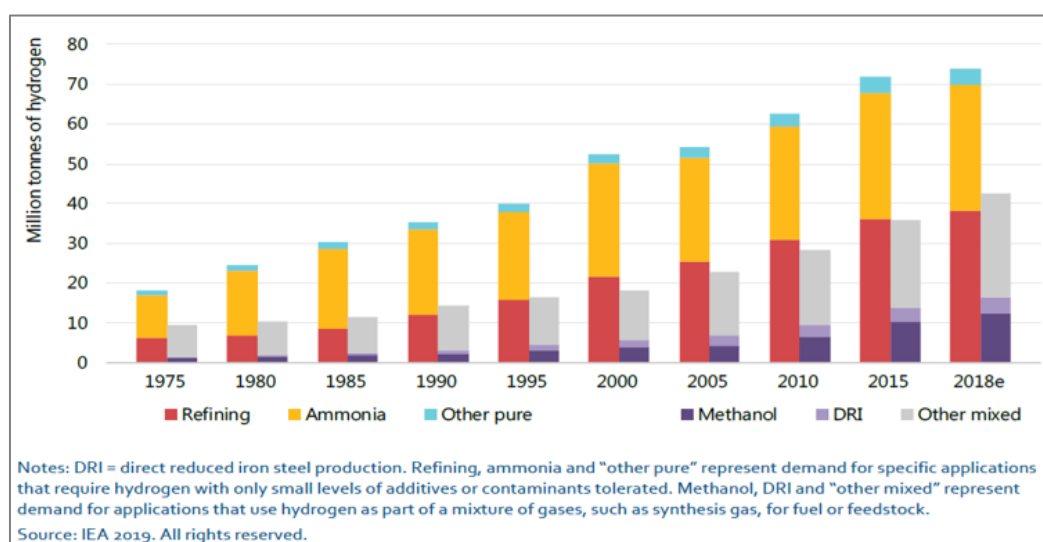
La tecnología de electrólisis del agua, alimentando la electricidad necesaria mediante energías renovables, permite producir el denominado hidrógeno verde, con un enorme potencial en el país debido a contar con inmejorables condiciones tanto en irradiación solar (para el aprovechamiento fotovoltaico) como en sus vientos (para el aprovechamiento eólico).

También existen alternativas de producción de hidrógeno menos desarrolladas (algunas en etapa de laboratorio) tales como:

- A partir del reformado de bioalcoholes (como el etanol proveniente de la caña de azúcar o de la fermentación de maíz, y el glicerol, obtenido de la producción de biodiesel).
- A partir de sistemas bioelectroquímicos (BES) para la transformación de aguas residuales en un recurso renovable (producción de bio-hidrógeno).
- Mediante biomasa (por ejemplo, algas).

La demanda de hidrógeno a nivel mundial se revela en franco ascenso. Actualmente, los procesos con mayor demanda de hidrógeno son los relacionados con la producción de amoníaco, metanol, reducción directa de hierro, y se espera que sumado a esto se asocie el uso de hidrógeno para el transporte y a nivel residencial, entre otros destinos.

Gráfico 2. Demanda global anual de hidrógeno en el mundo



Fuente: Borio, D (2021).

Todo ello lleva a considerar que hay grandes oportunidades para el país asociadas con el aumento de su producción y usos, a la vez que se cumple con el objetivo de reducir fuertemente el impacto ambiental y las emisiones dióxido de carbono a la atmósfera.

Producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua (hidrógeno verde)

La electrólisis hace uso de la electricidad para descomponer la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. De este modo, producir hidrógeno consume necesariamente energía y la eficiencia asociada a su generación tiene relación con la manera en que se aprovecha la energía invertida. Cuanto más hidrógeno se produzca para la misma cantidad de energía, mayor es la eficiencia del proceso productivo.

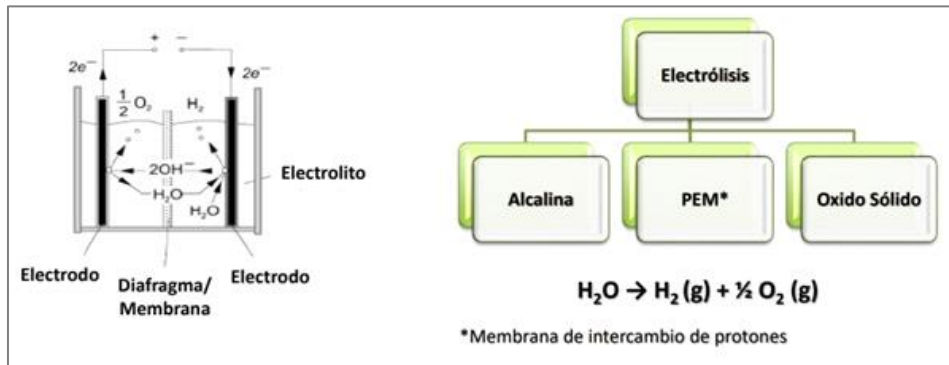
Esa energía puede ser obtenida por diferentes vías, más o menos sostenibles según logren minimizar o directamente evitar la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. El hidrógeno obtenido sin la emisión de CO₂ es llamado hidrógeno verde. A pesar de existir muchas vías para la producción de hidrógeno, la producción electrolítica constituye una de las pocas para la producción de hidrógeno verde y la única que permite aprovechar el enorme potencial de las energías renovables que tiene Argentina.

El hidrógeno producido por la vía electrolítica está libre de contaminantes como monóxido de carbono o dióxido de carbono, aunque puede tener cantidades de oxígeno que limiten su utilización en otros sistemas, como, por ejemplo, la celda de combustible. Esta última, transforma la energía química del hidrógeno nuevamente en energía eléctrica para usos móviles, como ser en automóviles, locomotoras, autoelevadores, drones, o para uso estacionario, fundamentalmente reemplazando baterías de plomo ácido.

El dispositivo en el cual se realiza el proceso se denomina electrolizador y está constituido básicamente por:

- La celda electroquímica, compuesta de electrodos, donde se producen los productos de este proceso (hidrógeno y oxígeno).
- El diafragma, el cual permite dividir los compartimientos donde se generan los gases, evitando que ambos se mezclen.
- En el caso de los equipos que la utilizan, una membrana, que no solo separa los compartimientos y evita la mezcla de los gases, sino que también hace de canal para el transporte de ciertas especies químicas en forma selectiva.
- El electrolito, que permite la producción de la corriente eléctrica.

Gráfico 3. Esquema de electrolizador y tecnologías asociadas



Fuente: Lavorante, M. J. (2021).

Existen tres tecnologías vinculadas a la electrólisis del agua. Las condiciones de operación y materiales requeridos son diferentes o bien particulares a cada tipo de tecnología:

Cuadro 1. Tecnologías de electrólisis – principales ventajas y desventajas

Electrolizadores	Estado del arte	Ventajas	Desventajas
Alcalinos	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología comercial madura 	<ul style="list-style-type: none"> Son más económicos Tecnología simple, barata y de mantenimiento sencillo Eficiencia energética del 70%/80% 	<ul style="list-style-type: none"> Bajas densidades de corrientes Formación de productos sólidos sobre los electrodos (disminuye la eficiencia)
PEM	<ul style="list-style-type: none"> Comerciales, aunque a baja escala y aún en fase de desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> Altas densidades de corriente Diseño más compacto y de respuesta rápida Alta eficiencia energética (80% - 90%) Elevada pureza de los gases (99.9%) Ideales para energías renovables 	<ul style="list-style-type: none"> Los elementos para su construcción más costosos (metales nobles y membrana de Nafion provista solo por Dupont) Baja vida útil
Óxido sólido	<ul style="list-style-type: none"> No comercial (aún en etapa de prototipo) 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia energética (casi 100%), no necesita metales nobles y puede trabajar a alta presión Electrocatalizadores más económicos (sin necesidad de metales nobles) Elevadas temperaturas de operación permitirían acoplarlos a sistemas que liberan calor como centrales nucleares (para producción de hidrógeno rosa) 	<ul style="list-style-type: none"> Baja vida útil de los componentes (por elevadas temperaturas de operación, entre 700° y 1000°) Diseño más complejo del sistema

Fuente: Elaboración propia con base a Lavorante, M. J. (2021) y Franceschini, E. (2021).

Los expertos manifestaron que, con el objetivo de avanzar en el desarrollo de tecnología nacional será importante:

- Considerar que las escalas de producción son muy variadas y deben estar en función de la demanda, no existiendo una tecnología que dé solución a todas las demandas lo que pone en valor explorar todas las tecnologías.
- Considerar y conocer diferentes parámetros vinculados a diversos indicadores de rendimiento:
 - Del sistema en general: Consumo de energía (Kwh/Kg); costo del capital [$\$/(\text{Kg/d})$]; costo de operación y mantenimiento [$\$/(\text{Kg/d})/\text{año}$]; tamaño del equipo.
 - Del *stack*: Degradación (%/1000hrs); densidad de corriente (A/cm²); carga de metales preciosos (mg/cm²); durabilidad de catalizadores y electrodos (hs).
- Investigar en componentes mucho más eficientes y económicos. Actualmente el país contaría con capacidades para producir celdas alcalinas convencionales, mayormente con materiales que actualmente se comercializan en la región, como ser acero, níquel, polipropileno, teflón, etc., con un porcentaje mínimo de piezas importadas.
- En el caso de la tecnología PEM (membrana de intercambio de protones), la mayor parte de sus componentes al día de hoy son importados (membrana de Nafion, catalizadores de platino, sellos de teflón siliconado). En este sentido existen espacios para el desarrollo local de componentes alternativos que los reemplacen y que vayan reduciendo la necesidad de importarlos. Existen grupos de investigación que ya verificarían avances al respecto.
- Todos los sistemas de electrólisis cuentan con dos partes bien definidas: La celda electroquímica y la electrónica de control. En todos los casos, la electrónica de control actualmente no se produciría en el país, pero sí habría capacidades para llevar adelante la integración de los dispositivos electrónicos que forman el lazo de control y desarrollar el software.

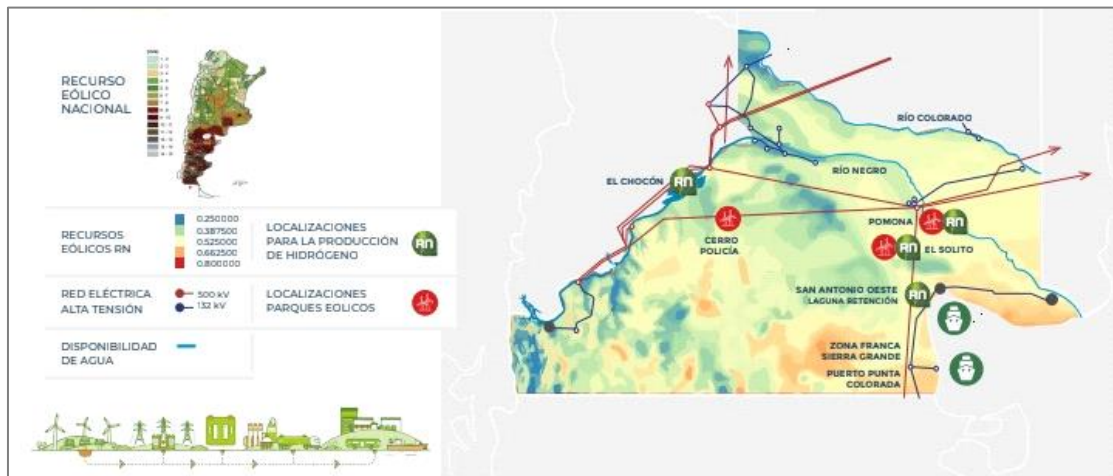
Proyecto de la provincia de Río Negro-Fraunhofer para producción de hidrógeno verde a partir de la energía eólica y el agua

A la fecha en que se llevó a cabo el Ciclo la provincia de Río Negro hacía más de un año que se encontraba trabajando con el Instituto Fraunhofer (Alemania) en el análisis y factibilidad que posee la provincia para producir hidrógeno verde.

En el estudio de prefactibilidad, se analizaron cuatro localizaciones específicas y más de 78 escenarios que tienen que ver con la posibilidad de producir hidrógeno verde en Río Negro.

Las localizaciones analizadas son: El Chocón, Pomona, El Solito, y Laguna de la Retención, un gran reservorio de agua depositario de un canal que viene del Río Negro. Dicho reservorio se utiliza al 40% y abastece de agua dulce al puerto y a la localidad de San Antonio Oeste y a la localidad de Las Grutas. Allí, la provincia cuenta con grandes extensiones de tierras fiscales, con una eficiencia eólica que ronda los 8,5 mts/s, un lugar bastante elevado con respecto al nivel del mar y sería, según los expertos, una localización muy interesante para producir hidrogeno verde si el objetivo es la exportación del producido por esta tecnología. (uno de los supuestos analizados por Fraunhofer y la provincia).

Gráfico 4. Localizaciones analizadas en el estudio de pre-factibilidad



Fuente: Medina, G. (2021).

Para ello se analizó, se costó y se vieron los distintos alcances de la tecnología en cuanto a su estadio actual y se analizó un electrolizador de 500 megas para el proyecto exportador de la provincia, así como estudios vinculados al agua, los vientos y tierras involucradas.

En el mediano plazo:

- La provincia busca posicionarse a la vanguardia de esta tecnología.
- Buscan valorizar el hecho que alrededor del paralelo 42 poseen una de las mejores áreas para producir en forma renovable y fundamentalmente en forma eólica la electricidad necesaria para la electrólisis del agua.
- Pretenden trabajar con una mirada integral, de desarrollo e industrialización de toda la cadena de valor asociada a la producción del hidrógeno verde (desde la tracción de nuevos asentamientos industriales que se asienten en la provincia, hasta generar un derrame en el vasto sector académico de la provincia generando también mano de obra e inclusión social.
- El informe recibido de Fraunhofer muestra que Argentina está en el puesto 3 a nivel global como futura productora de hidrógeno.

- Están avanzando contactos con empresas nacionales, locales y extranjeras que están visualizando a Río Negro como una plaza de inversiones.

Entre las principales características, encontramos:

- Las temperaturas en la cuales se lleva a cabo las reacciones de reformado de bio-alcoholes son algo menores a la del reformado tradicional de metano.
- Los catalizadores empleados son similares a los empleados tradicionalmente en el reformado de metano, con lo cual hace que el reformado de bio-alcoholes sea actualmente una tecnología madura.

En los últimos años se ha incursionado en el estudio de acoplar las reacciones de reformado de bio-alcoholes con la absorción del dióxido de carbono. Los expertos estiman que, con el proceso de reformado con absorción simultánea de dióxido de carbono, lo que se logra es potenciar los efectos de las reacciones de reformado. Así, se logra aumentar la pureza del proceso, alcanzando valores en torno al 95%, mientras que en el reformado tradicional de bio-alcoholes se logran purezas en torno al 75%. Asimismo, esto permitiría lograr un proceso con una menor demanda energética ya que los procesos absorptivos son procesos exotérmicos.

Sistemas bioelectroquímicos (BES) para la transformación de aguas residuales en un recurso renovable. Producción de bio-hidrógeno

Una celda electroquímica es un dispositivo con dos electrodos conectados con un circuito externo, donde ocurren reacciones de oxidación en un ánodo. Los electrones generados de esa oxidación son reducidos en un cátodo. Un sistema bioelectroquímico (BES) es similar, la diferencia es que las reacciones de oxidación, las de reducción o ambas son catalizadas por microorganismos, lo que presenta una serie de ventajas y desventajas respecto a los electrolizadores comunes.

El desarrollo de los BES viene de la mano de un cambio de paradigma a nivel mundial en donde se busca dejar de ver a los efluentes como tal, para convertirlos en una fuente de recursos renovables. Todos los efluentes generados conllevan la necesidad posterior de tratarlos para disminuir la concentración de compuestos orgánicos antes de volcarlos al medio ambiente. Los BES representan una plataforma muy versátil que permiten convertir las aguas residuales en un recurso renovable, por ejemplo, para la producción de hidrógeno.

En el año 2005 se generó la primera adaptación de un BES que permitió la producción de hidrógeno. Por lo que aún son sistemas muy novedosos. Los reactores desarrollados en la

actualidad son mayormente a escala de laboratorio. Según los expertos, estos sistemas han demostrado ser muy eficientes en el tratamiento de aguas, generando una disminución de uno de los parámetros que se considera para el tratamiento de aguas: la demanda química de oxígeno.

También han mejorado el rendimiento en producción de hidrógeno. A pesar de que la eficiencia de producción de hidrógeno no es tan alta como otros electrolizadores y el hidrógeno producido no tiene tanta pureza como un electrolizador de agua el balance en neto de energía es positivo: la energía obtenida como hidrógeno o mezclado de hidrógeno con metano es muy superior a la energía que se le debe entregar al sistema para poder funcionar.

La ventaja de los BES respecto a otros sistemas radicaría en que los compuestos orgánicos están presentes en exceso y en gran abundancia en efluentes generados por el hombre, sean estos efluentes de origen domésticos, cloacales o producto de diversas actividades industriales.

Aplicaciones de los BES: Actualmente, ya se están implementando aplicaciones utilizando los sistemas BES para proporcionar energía en zonas remotas, aunque aún a baja escala y alimentando dispositivos que requieren baja energía en general. Por ejemplo, en dispositivos para alimentar baterías de boyas meteorológicas.

En aplicaciones de mayor escalado, como una planta de tratamiento de efluentes cloacales, se está muy lejos aún por las dificultades que tiene el escalado.

Desafíos y esfuerzos de optimización:

- El principal desafío es adecuar la tecnología a las condiciones y necesidades regionales, optimizándola para su empleo con diferentes efluentes
- Actualmente los esfuerzos para la optimización de los BES están centrados en dos grandes puntas de esta tecnología:
 - Al igual que con los electrolizadores de agua para la producción de hidrógeno, uno de los principales desafíos gira en torno a la ciencia de los materiales. Investigar materiales que sean de menos costos. Las búsquedas se centran en trabajar en materiales que sean biocompatibles, conductores y de bajo costo; en este sentido, los más aptos y los más usados son materiales a base de carbono. En Argentina, en el IDES - CNEA se están desarrollando electrodos a base de hidrogeles de grafeno, que, según afirman, brindan excelentes resultados comparados con los electrodos tradicionales.
 - También y en especial, se están estudiando los microorganismos con los que se trabaja en estos sistemas, ya que no cualquier bacteria puede participar de este proceso. Son bacterias anaeróbicas, que pueden reducir metales, óxidos de metales que están en el exterior de la célula. Esto se describió en la década de los 90, por eso es tan reciente.

Producción del hidrógeno a partir de biomasa (algas)

Las algas son un grupo variado de organismos que habitan una gran cantidad de hábitats y que se distinguen, en términos fisiológicos y bioquímicos, por ser fotosintéticos y tener la capacidad de producir oxígeno. Merced a la gran diversidad de sus metabolismos, actualmente se encuentran numerosas aplicaciones biotecnológicas, fundamentalmente en las áreas de: energía; biorremediación; y la producción de metabolitos de alto valor agregado, como proteínas, aceites, azúcares o pigmentos.

El cultivo de algas hace ya varias décadas que está resuelto a nivel masivo, en fotobiorreactores, donde pueden crecer a base de iluminación solar o con fuentes de luz artificial, y en cultivos de algas masivos en piletones abiertos.

Existen dos métodos de producción de hidrógeno biológico utilizando algas:

- Fotólisis del agua: la fotosíntesis común de las algas en condiciones de anaerobiosis, en lugar de fijar dióxido de carbono, utiliza la energía solar y los electrones provenientes de la fotólisis del agua para la síntesis de una molécula de hidrógeno.
- Producción de hidrogeno a partir de biomasa de algas: se produce la biomasa de algas y se aplican sobre ella procesos de fermentación.

Ambos procesos tienen como producto la generación de hidrógeno con mezcla de otros gases, por lo que es necesario separarlo, generando también biomasa residual.

Otro método, aunque no asociado estrictamente con cuestiones biológicas es, una vez obtenida la biomasa de algas, se puede aplicar directamente sobre ella un proceso de gasificación térmica. Este es un proceso completamente diferente, termoquímico, en el cual la biomasa se lleva a altas temperaturas y por una oxidación parcial de la biomasa también se puede obtener hidrogeno con mezcla de otros gases y biomasa residual.

Estado de la tecnología:

- La tecnología aún se encuentra en etapa de I+D. La investigación se realiza intensamente en las áreas de optimización del cultivo de algas para mejorar los rendimientos y la calidad de la biomasa para los procesos de *downstream*.
- Se está investigando muy activamente en las cepas, la fisiología y en la biología de esas cepas para poder optimizar desde la base, la producción y rendimiento de hidrogeno.
- También se están optimizando las reacciones que conducen a la formación de hidrógeno, sobre todo los procesos de fermentación.
- Se avanza en la idea de asociar la producción de hidrógeno por algas al input o la alimentación del proceso con residuos de otras industrias, así como evaluar la producción de biomasa que se generan en estos procesos, y la capacidad de obtener

productos asociados, mejorando no solo el balance energético sino también el impacto de estas y otras tecnologías en el desarrollo del hidrogeno propiamente.

Según lo manifestado en el Ciclo por los expositores, la Argentina tendría un gran potencial en el desarrollo de biomasa de algas y, a partir de eso, pensar en la optimización de estos procesos.

Sin embargo, es importante señalar que actualmente es una tecnología aún en desarrollo (de laboratorio), donde el proceso de producción de hidrogeno por fotólisis directa, que es el que utiliza la fotosíntesis de las algas, ha logrado en la actualidad una tasa de conversión de la energía lumínica de solamente un 15%.

Cuadro 2. Algas e hidrógeno: ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Está basado en una producción de biomasa que es claramente renovable • Tecnología limpia, producen cero o muy pocos subproductos que puedan impactar negativamente en el entorno • El cultivo masivo de algas está resuelto • Permitiría, acoplado con otros procesos, la mitigación de contaminantes (por ejemplo, en efluentes) o las emisiones de CO₂. • Permite la generación de productos asociados que podrían agregarle otro valor al proceso más allá de la producción de hidrogeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología aún en etapa de I+D • Rendimientos aún bajos en términos de producción de hidrogeno • Falta conocer más sobre las cepas y los procesos biológicos de la fisiología de estos microorganismos que gobiernan el proceso de producción de hidrogeno • Al ser procesos biológicos, requieren de monitoreo permanente en el proceso de ejecución y optimización del proceso. Esto eleva los costos operativos, de control de los reactores y de la tecnología en general.
<p>Fuente: Elaboración propia con base a Bagnato, C. (2021).</p>	

Tecnologías maduras de producción a gran escala y transformación de hidrógeno gris en azul

En la actualidad el hidrógeno se produce mayoritariamente a partir de gas natural y carbón. En efecto, la tecnología más difundida y madura es el reformado de metano con vapor que, teniendo la ventaja de la gran escala, emite CO₂ a la atmósfera y produce el denominado hidrógeno gris.

A los equipos utilizados en este último proceso se los denomina "*Steam Methane Reformer*" (SMR). El proceso es una reacción endotérmica dentro de un tubo donde hay un catalizador que facilita la reacción entre el metano y el vapor, obteniendo como resultado monóxido y 3 moléculas de hidrógeno. Posteriormente se hace otra conversión con el

agregado de más agua al monóxido, obteniendo dióxido de carbono e hidrógeno. Como resultado final se obtiene un Syngas a alta temperatura, compuesto por hidrógeno, monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono, el cual después es procesado y purificado en otros equipos. A través de este proceso, con una tonelada de gas natural, una empresa como Air Liquid obtiene 240 kg de hidrógeno gris.

Esta tecnología se puede asociar con la producción de biometano, sin que sea necesario que sea metano proveniente de otros reservorios de hidrocarburos, con lo cual es factible de ser integrado a la producción con biomasa.

Mercados actuales de hidrógeno gris:

- El hidrógeno gris actualmente es utilizado en la industria química y petroquímica, básicamente como materia prima para la producción de fertilizantes (urea y amoníaco) y en refinación en la desulfuración de naftas y gasoil para adecuación de calidades a EURO V y siguientes.
- En otros sectores, a menor escala, se lo utiliza en los tratamientos térmicos de acero, como atmósfera en la producción de vidrio, en la producción de fibras textiles, espuma de poliuretano y diversas aplicaciones.
- En la industria de grasas y aceites se lo utiliza para producir grasas hidrogenadas y para la obtención de alcoholes y ácidos grasos.

Convirtiendo el hidrógeno gris a azul: Con base en el hidrógeno gris, mediante la incorporación de tecnologías de captura de este carbono, se produce el denominado hidrógeno azul, evitando la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Lo más importante a tener en cuenta del CO₂ es a dónde va a ser aplicado.

Algunas aplicaciones del CO₂: En el *oil & gas* se puede utilizar para recuperación secundaria de gases; se puede utilizar en algas; en la producción de urea y en la producción de metanol.

A modo de reflexión se señaló que la oportunidad se vincula a que:

- El hidrógeno azul es una de las formas de llegar rápidamente a la producción y a la instalación/posicionamiento del hidrógeno como vector energético durante la transición hasta llegar a tener tecnologías que produzcan hidrógeno verde en forma confiable y madura.
- Las oportunidades que esto presenta para Argentina son dos: i) Utilizar las fuentes de hidrógeno que hay disponibles hoy en el mercado, en la industria química y petroquímica ya que hay excedentes de hidrógeno que podrían ser capturados y utilizados rápidamente; y ii) Reposicionar o reconvertir la estrategia de Vaca Muerta, utilizando las amplias reservas de gas natural para producir hidrógeno, dándole valor a través de la obtención de hidrógeno azul.

3. Oportunidades y desafíos en el almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno

En el marco del Ciclo se abordó un tema fundamental para el desenvolvimiento de la cadena de valor del hidrógeno en un país tan extenso y con tantas posibilidades alternativas para su producción. En efecto, las posibilidades técnicas para el almacenamiento, transporte y distribución constituyen determinantes clave de las características que tomará la industria del hidrógeno en Argentina.

Al respecto, de manera introductoria, los especialistas postularon que el hidrógeno constituye una de las dos formas de almacenar energías alternativas (el litio es la otra), con la particularidad de que, además, el hidrógeno es en sí mismo una forma de energía. Con lo cual, el almacenamiento de hidrógeno podría condicionar (potenciando o limitando) la producción de energías renovables. El transporte a los centros de consumo plantea otros desafíos, debido a que es relativamente costoso. De hecho, el almacenamiento de hidrógeno para transporte supone mayores desafíos que el almacenamiento estacionario, fundamentalmente en términos de tecnologías y maquinarias de altos costo. Por otra parte, cabe señalar que la extensa red de gasoductos con la que cuenta el país supone un activo importante, pero presenta limitaciones, puesto que, por cuestiones técnicas, un gasoducto actualmente sólo puede transportar entre un 10 y 15% de hidrógeno.

Tecnologías de almacenamiento del hidrógeno

Por su tipo de combustión y su densidad gravimétrica de energía, el hidrógeno resulta de mucho interés para las aplicaciones energéticas. Sin embargo, y en contrapartida, en condiciones normales tiene una densidad volumétrica muy baja. Esta característica se encuentra motivando esfuerzos de investigación y desarrollo en todo el mundo con el propósito de ganar en eficiencia en el almacenamiento del hidrógeno a partir de tecnologías que posibiliten incrementar su densidad volumétrica.

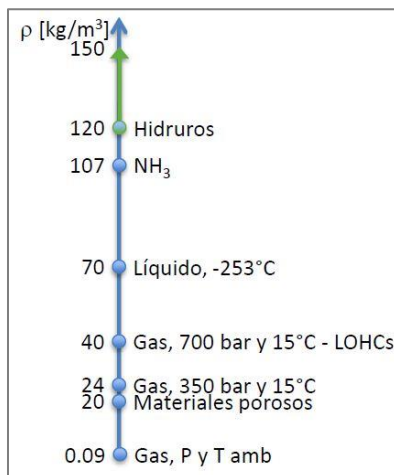
En este sentido, el almacenamiento del hidrógeno constituye por sí mismo un desafío tecnológico. Los tipos de almacenamiento se distinguen entre físicos y químicos, de acuerdo con el detalle de la siguiente tabla.

Cuadro 3. Tipos de almacenamiento del hidrógeno

Tipo	Forma	Detalle
Físico (en forma molecular)	Comprimido	Se trata de una tecnología madura. El hidrógeno se almacena en tanques, cuyo tipo y materiales dependen de la presión. Con tanques de acero se alcanzan densidades de más de 250 veces respecto a condiciones normales. En aplicaciones móviles se buscan presiones mayores, por lo cual se utilizan tanques de materiales poliméricos reforzado con fibras de carbono.
	Líquido	Se realiza en tanques criogénicos, que son muchos más complejos que los de almacenamiento de hidrógeno comprimido. Es una tecnología que actualmente sólo se aplica en actividades aeroespaciales.
	Materiales porosos	Son estructuras de alta porosidad que absorben el hidrógeno, lográndose densidades no muy elevadas pero eficientes y con la ventaja de que la absorción y desorción es muy rápida. Desventaja: por tratarse de una interacción débil su temperatura de trabajo es la del nitrógeno líquido.
Químico	Transportadores líquidos	Pueden ser orgánicos o inorgánicos. En algunos casos se logran altas densidades, pero aún falta mucho desarrollo. Son posibles almacenadores para grandes volúmenes.
	Hidruros	Presentan densidades volumétricas muy elevadas, triplican el del gas en cilindros de alta presión. Son sistemas muy interesantes, porque no sólo permiten almacenar, sino que también permite purificar hidrógeno y comprimirlo químicamente. Hay muchos sistemas.
Fuente: Elaboración propia con base a Urretavizcaya, G. (2021).		

Dado a que una de las medidas clave para evaluar objetivamente el potencial de almacenamiento de la tecnología es la densidad volumétrica, en la siguiente imagen se muestran los niveles que alcanzan cada uno de los tipos desarrollados:

Gráfico 5. Densidad volumétrica según tipo de tecnología de almacenamiento



Fuente: Urretavizcaya, G. (2021).

Desarrollos tecnológicos basados en materiales formadores de hidruros del Centro Atómico Bariloche-CNEA y resolución de problemas del laboratorio a la industria

El hidruro es un compuesto químico, fruto de la interacción exotérmica entre el hidrógeno y un material sólido, como ser un metal. En la ilustración anterior se puede advertir que los hidruros metálicos y los hidruros complejos tienen las densidades volumétricas más altas entre todos los sistemas, triplicando, por ejemplo, la del gas en cilindros de alta presión.

Son sistemas muy versátiles para el tratamiento integral del hidrógeno. En efecto, no sólo permiten almacenar, sino también extraer hidrógeno de muy alta pureza, posibilitando su purificación. Además, sirven para comprimirlo químicamente, lo cual se produce en los casos en que la desorción se realiza a una temperatura superior a la cual se absorbió.

En Argentina se cuenta con capacidades para el desarrollo tecnológico en sistemas y materiales formadores de hidruros. En particular, el Departamento de Fisicoquímica de Materiales del Centro Atómico de Bariloche hace más de 20 años que se encuentra trabajando en esta línea de investigación. A saber:

- Sistemas basados en el lantano níquel 5, un sistema que permite trabajar a temperaturas cercanas al ambiente, para almacenamiento, purificación y compresión.
- También en sistemas basados en hidruro de magnesio, que tiene una alta capacidad de almacenamiento y tiene la ventaja de ser económico, pero la desventaja de ser bastante estable.

- Hidruros ternarios basados en magnesio, con otros metales de transición, como níquel, hierro y cobalto.
- También en hidruros complejos. En estos sistemas el hidrógeno tiene un enlace covalente con un elemento muy liviano, por lo que las capacidades de almacenamiento resultan muy elevadas.
- Por último, en sistemas basados en amiduros e hidruros, que son sistemas más complejos. En particular en uno que tiene una capacidad de almacenamiento muy buena y permite trabajar a una temperatura del orden de los 200°, lo suficientemente baja para que sea de aplicación en un vehículo alimentando una celda de combustible. Además de las evaluaciones técnicas, se elaboró una evaluación económica completa para su aplicación en Argentina. Comparándolo con el uso de hidrógeno comprimido en tubos de alta presión, la relación de costos es 2:1.

El hecho de que la reacción que da origen al hidruro sea reversible (depende de la temperatura a la cual se realiza) abre la posibilidad a un sinnúmero de posibilidades de desarrollo y aplicación de dispositivos.

Cuadro 4. Posibilidades de desarrollo de dispositivos tecnológicos a partir de las propiedades que presentan los hidruros

Propiedad del hidruro	Posibilidad
El material al reaccionar con hidrógeno forma un compuesto que puede almacenarlo en grandes cantidades a la misma presión...	...es posible hacer almacenadores de hidrógeno reversibles que pueden ser utilizados para aplicaciones móviles o estacionarias.
La reacción va a cambiar a la presión que ocurra con la temperatura...	...se pueden utilizar para almacenar hidrógeno a baja temperatura y presión, posibilitando hacer compresores sin partes móviles.
Únicamente reaccionan con el hidrógeno...	...se pueden utilizar para purificar.
Durante la absorción se genera calor y se toma durante la desorción...	...es posible elaborar sistemas de calefacción y refrigeración.
Fuente: Elaboración propia con base a Meyer G. (2021) y Urretavizcaya, G. (2021).	

A modo de síntesis, se puede señalar que los desarrollos de sistemas basados en hidruros cuentan con espacios de intervención concretos en las diferentes instancias del tratamiento del hidrógeno hasta su almacenamiento, a saber: compresión, captura, purificación y, propiamente, almacenamiento. El grupo de investigación del Departamento de Físicoquímica de Materiales del Centro Atómico Bariloche hace años que viene trabajando

con estos materiales, además de estudiándolos, desarrollando soluciones para el laboratorio y la industria. Los mismos se resumen en la siguiente tabla:

Cuadro 5. Desarrollos tecnológicos para resolución de problemas y transferencia.

Campos de aplicación	Desarrollos
Compresión	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un reactor para transportar hidrógeno a fines de hacer experimentos fuera del laboratorio, que además actúa como compresor.
Captura	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de un prototipo de captura de hidrógeno en una mezcla de gases radiactivos en respuesta a un requerimiento de la industria nuclear. Actualmente están diseñando y construyendo el equipo que se instalará en la planta.
Purificación	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de una solución para la empresa FAE S.A. para recuperación del hidrógeno resultante de un proceso de combustión. En laboratorio se recuperó más del 95% del hidrógeno, por lo que actualmente se encuentran construyendo un prototipo para instalar en la planta.
Almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de materiales que trabajen a temperaturas bajo 0° para reemplazar cilindros de gas de hidrógeno de alta presión para prevenir avalanchas de nieve. Se utilizó un material formador de hidruro que, para la misma cantidad de hidrógeno, utilizaría 1/7 del volumen y 1/20 de la presión (mayor seguridad). • Proyecto en elaboración para almacenamiento y gestión de energía eléctrica a partir de tres requerimientos de: un centro de esquí en Mendoza (con energía renovable), Vaca Muerta y una cooperativa eléctrica en la Ciudad de Bariloche. La solución planteada consta en producir hidrógeno por electrólisis de agua, almacenar ese hidrógeno en una matriz sólida y luego, al requerirse, generar energía eléctrica mediante una celda combustible.
Fuente: Elaboración propia con base a Meyer, G. (2021).	

Desafíos y normativas para el transporte de hidrógeno

El transporte de hidrógeno, en la actualidad, es relativamente costoso. De hecho, el propio almacenamiento para transporte supone mayores desafíos que el almacenamiento estacionario, pues habitualmente requiere trabajar a altas presiones o en formas líquidas, lo cual insume tecnologías y maquinaria costosa. Y del transporte dependen las posibilidades reales de abastecer a los lugares de consumo, condicionando su adopción masiva. De modo que la infraestructura de transporte y almacenamiento representa uno de los principales obstáculos para el desarrollo industrial y del mercado de este sector energético.

Distintas formas de transportar el hidrógeno:

- Desde el punto de vista físico: líquido, sólido o gaseoso.
- En función de la tecnología empleada para su desplazamiento: gases comprimidos, líquidos criogénicos, combinaciones químicas (hidruros metálicos) o portadores del hidrógeno como amoníaco o líquidos orgánicos (LOHC).

En el marco de la jornada respectiva del Ciclo se desarrollaron las principales formas de transporte:

- Gasoductos: Como se mencionó anteriormente, los gasoductos tienen limitaciones técnicas para transportar hidrógeno, por lo cual se requieren nuevos materiales o ductos específicos (hidrogenoductos). Además, el tendido de ductos tiene problemáticas ambientales y requiere mucha inversión. En cualquier caso, no representa una solución a gran escala a corto plazo, al margen de algunos experimentos que se están desarrollando en Europa.
- Como gas en tubos: Puede transportarse en pequeñas y medianas cantidades en tubos de diferentes presiones. Puede hacerse por medio de camiones, trenes o barcos o por *tube trailers* de hidrógeno gaseoso comprimido, que consisten en la combinación de distintos tubos. Es preciso subrayar que por una cuestión de costos es razonable que el transporte carretero no se extienda más allá de 400/500 km. A partir de esas distancias es más económico el ferrocarril.
- En forma líquida: Es una alternativa para distancias de más de 1.000 km. Se lo puede licuar y emplear camiones cisternas para transportarlo como un líquido criogénico.
- Como amoníaco o líquidos orgánicos (LOHC): Puede transformarse en sustancias líquidas fácilmente transportables empleando las actuales redes de suministro, tales como el metanol, el octano, el amoníaco o los derivados de amoníacos, entre otros.

En síntesis, se puede señalar que el transporte del hidrógeno puede realizarse en forma terrestre, ferroviaria y marítima, dependiendo de la infraestructura, las posibilidades técnicas y la función de costos. Incluso se ha desarrollado mucho el transporte multimodal, que se emplea fundamentalmente para el comercio exterior.

Normativa y reglamentación

Un punto a destacar tiene que ver con la normativa. Todo el transporte de hidrógeno tiene una clasificación de la ONU, en el marco de un reglamento para el transporte de mercancías/sustancias peligrosas (libro naranja). Cada uno de los modos de transporte cuenta con sus propias reglamentaciones o instrucciones técnicas. Con materiales más ligeros y presiones más elevadas podría incrementarse la carga útil; sin embargo, su

implantación obligaría a introducir cambios en los estrictos reglamentos, códigos y normas vigentes.

En el caso de Argentina, la autoridad competente para el transporte marítimo es la Prefectura Naval, que aparte de manejarse con el código I.M.D.G. de la ONU, tienen sus propias ordenanzas que hacen referencia al transporte de mercancías peligrosas. En el transporte aéreo, la autoridad competente en Argentina es la Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). También tenemos las leyes de tránsito y seguridad vial (Ley 24.449) y la ley de transporte automotor de carga (Ley 24.653).

Otra de las autoridades en la materia es el INTI, que cumple un rol muy relevante en lo que respecta a certificaciones de cisternas, embalajes o tubos. De hecho, ha celebrado convenios con las autoridades competentes mencionadas como laboratorio de referencia.

Desarrollos de la industria nacional

En el marco del seminario se presentó el caso de la empresa Galileo Technologies S.A., que hace 30 años desarrolla tecnologías para la industria energética en general, siendo los precursores en el uso del GNC como combustible vehicular en Argentina. Cuenta también con el hito de haber contribuido a instalar en el año 2005 la primera estación de hidrógeno de Latinoamérica, la de Pico Truncado.

A raíz de desarrollos de alta tecnología, fundamentalmente para soluciones utilizando GNC para el transporte vehicular, la empresa se erigió como una de las referentes en diferentes países del mundo, especialmente Argentina. Y el hidrógeno comprimido para uso vehicular tiene muchos puntos en común con el gas natural comprimido. No obstante, consideran que el mundo se dirige hacia un hidrógeno que, en principio, va a ser una solución de acumulación de energía para capturar el excedente de la producción por fuentes renovables en las horas no pico.

Desde hace algunos años la empresa se encuentra desarrollando tecnología para el aprovechamiento del hidrógeno, en el marco de la cual se puede destacar una línea de soluciones para recargas de vehículos. En cartera también se encuentra el desarrollo de equipos para licuar hidrógeno (y facilitar su transporte) y para 2022 una unidad de reforming para convertir biogás en hidrógeno.

En este último proceso interviene el metano, que da cuenta de aproximadamente la mitad del biogás (el resto es dióxido de carbono) y se puede transformar completamente en hidrógeno verde. En este sentido, se advirtió que es muy probable que países con fuertes emisiones de metano, como Argentina, requieran en el mediano plazo soluciones amigables con el medioambiente. De modo que, como queda de manifiesto, las tecnologías de producción de hidrógeno también posibilitarían acciones de mitigación de impactos ambientales.

4. Oportunidades y desafíos en la implementación y utilización del hidrógeno en la movilidad

En línea con el objetivo general de este documento, a continuación, se resumen los principales aspectos destacados por los expertos en el Ciclo específicamente referidos a los usos finales del hidrógeno como combustible en el transporte y la movilidad eléctrica. La problemática ambiental (cambio climático) opera como el gran eje tractor de la transición energética, a la vez que se visualiza a la energía como un elemento estructurador de un nuevo modelo de desarrollo a nivel mundial.

En ese contexto se mencionó que el 75% de las emisiones de gas de efecto invernadero se producen por la actividad humana, donde el transporte explica el 15% de esas emisiones en América Latina. Todo esto plantea como desafío frente a la sociedad de reducir las emisiones en el sector del transporte e introducir una movilidad sostenible, tendiente a la descarbonización del transporte en general.

Celdas de combustible

En la base de la temática, en el Ciclo se destacó que una celda de combustible es básicamente un dispositivo electroquímico que funciona al revés que un electrolizador. Esto es, mediante procesos de electrodo convierte hidrógeno y oxígeno del aire en agua y energía eléctrica. Las celdas de combustible se clasifican según el tipo de electrolito que se utilicen en ellas:

- Celdas alcalinas: usan soluciones acuosas de hidróxido de sodio y potasio (trabajan a temperaturas de entre 65 y 220° C).
- Celdas PEM: son celdas en donde el electrolito es una membrana polimérica conductora de protones (trabajan a temperaturas menores a 100° C).
- Celdas que utilizan como conductores iónicos ácido fosfórico puro a temperaturas mayores de 200°C
- Celdas que usan carbonatos fundidos: mezcla de carbonato de litio con potasio y sodio (temperaturas del orden de 650°C)
- Celdas de óxido sólido: usan como electrolito un cerámico conductor de iones óxido o vacancias de óxido.

Cuadro 6. Algunos usos móviles de las celdas de combustible

Tipo de celda de combustible / Usos	PEM (80°-90° C)	Óxido sólido (> 600° C)
Usos potenciales	Automóvil eléctrico Buses Autoelevadores Drones Aviones no tripulados	Automóvil eléctrico <i>(con tanque auxiliar de bioetanol generando hidrógeno que alimenta la celda)</i> Transporte marítimo
Fuente: Elaboración propia con base a Corti, H. (2021).		

En los dos últimos tipos de celdas (utilizan carbonatos fundidos u óxido sólido), las altas temperaturas de trabajo requieren hidrógeno de menor pureza e incluso pueden usar como combustible el hidrógeno mezclado con monóxido que sale del reformado de gas natural, o directamente alcoholes (metanol y bioetanol), gas natural o biogás.

Los expertos señalaron que las celdas de alta temperatura, principalmente las de óxido sólido (SOFC), están orientadas principalmente a uso estacionario en grandes potencias (entre 1 y 10 megavatios), aunque ya existen prototipos de unos pocos kilowatts para usos domiciliarios. Si el concepto de energía distribuida se extiende en los próximos años, las SOFC serán una alternativa interesante por su alta eficiencia energética (80%-90% en cogeneración) y porque su alta temperatura de operación puede reformar combustible fósil in situ o tener un menor requerimiento en la pureza del hidrógeno.

Los grupos que trabajan en temas relacionados con la investigación básica y aplicada en celdas de combustible en Argentina pertenecen a instituciones muy reconocidas como la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), la Universidad de Buenos Aires (UBA), la Universidad de La Plata y el Centro de Investigaciones Técnicas de las Fuerzas Armadas, entre otras). La CNEA tiene las capacidades, estructuras y RR.HH. para liderar todos los aspectos de la economía del hidrógeno, incluyendo su producción, su almacenamiento y sus usos finales, estacionarios y móviles.

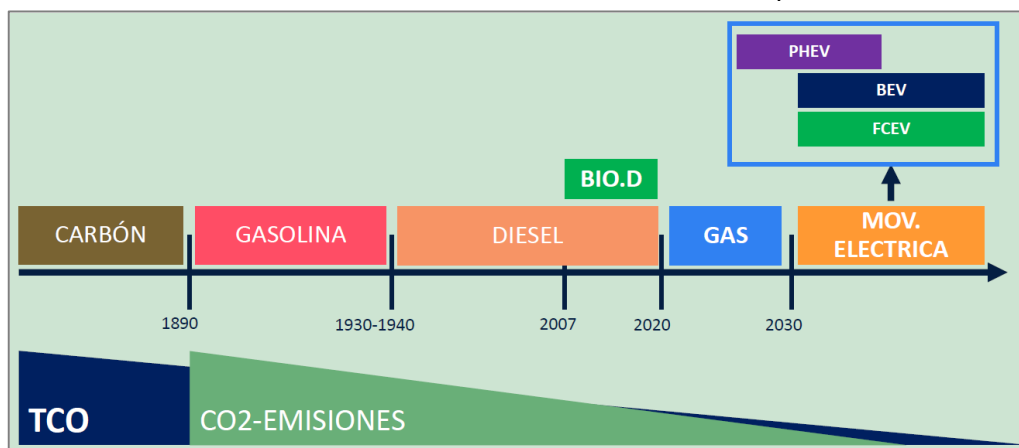
Evolución de los combustibles en el transporte

Según los especialistas, cuando focalizamos en el transporte de cargas o pasajeros el desafío es cómo disminuir el costo total de operación (TCO) y al mismo tiempo cuidar el medio ambiente (buscar alternativas más limpias).

En relación a cómo evolucionará el uso de combustibles en el transporte en los próximos años, los expositores del Ciclo coinciden en que:

- En lo que viene y hasta el 2030, el actor preponderante para mejorar el rendimiento ambiental y económico será el vehículo a gas, que es una tecnología ya madura y desarrollada en Europa. Aunque se la considera como una alternativa de transición hacia otro tipo de tecnologías. Argentina puede tener un rol destacado considerando que somos un país con abundantes yacimientos de gas y potencial de extracción.
- A partir del 2030, la movilidad eléctrica muy probablemente tomará otro nivel de preponderancia, ya con un desarrollo tecnológico superior y con infraestructura que permita que el TCO sea más equiparable a las alternativas tradicionales.
- La movilidad eléctrica engloba varios tipos de vehículos, como los híbridos e híbridos enchufables, una tecnología de transición que será reemplazada a los pocos años por vehículos completamente eléctricos a batería o vehículos a celda de hidrógeno.

Gráfico 6. Evolución de los combustibles en el transporte



Fuente: Rosso, J. (2021).

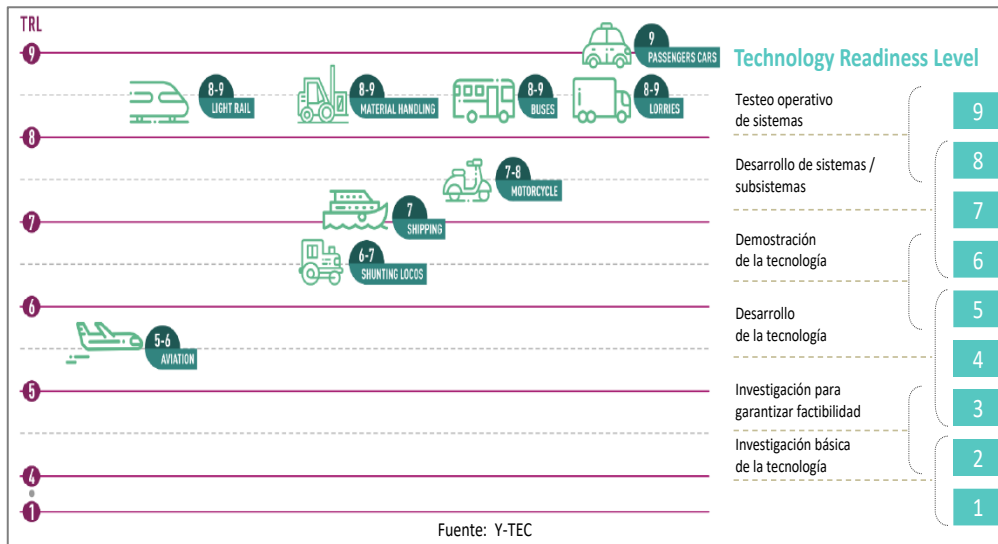
Así, un aspecto interesante que surge es que los vehículos a celda de combustible son vehículos eléctricos, que utilizan un gas que se oxida y produce electrones que se utilizan en un motor eléctrico y que también tienen baterías. Por lo tanto, hay muchas sinergias entre los vehículos eléctricos (a batería de litio) y los vehículos a celda de combustible, principalmente el balance del sistema y los sistemas auxiliares del *power train*. Todos tienen motores eléctricos, baterías e inversores de voltaje.

Usos potenciales del hidrógeno en la movilidad y oportunidades

En la imagen adjunta se resumen los distintos usos potenciales y niveles en que se encuentra el desarrollo de las tecnologías asociadas al hidrógeno en la movilidad. Allí se observa que, en los niveles más elevados, 8 y 9, se pueden encontrar sistemas que ya están operativos

comercialmente, pero todavía no han alcanzado una escala de masividad importante. Entre ellos: trenes ligeros; autoelevadores; buses; camiones y automóviles de pasajeros.

Gráfico 7. Usos y estados de desarrollo de las tecnologías

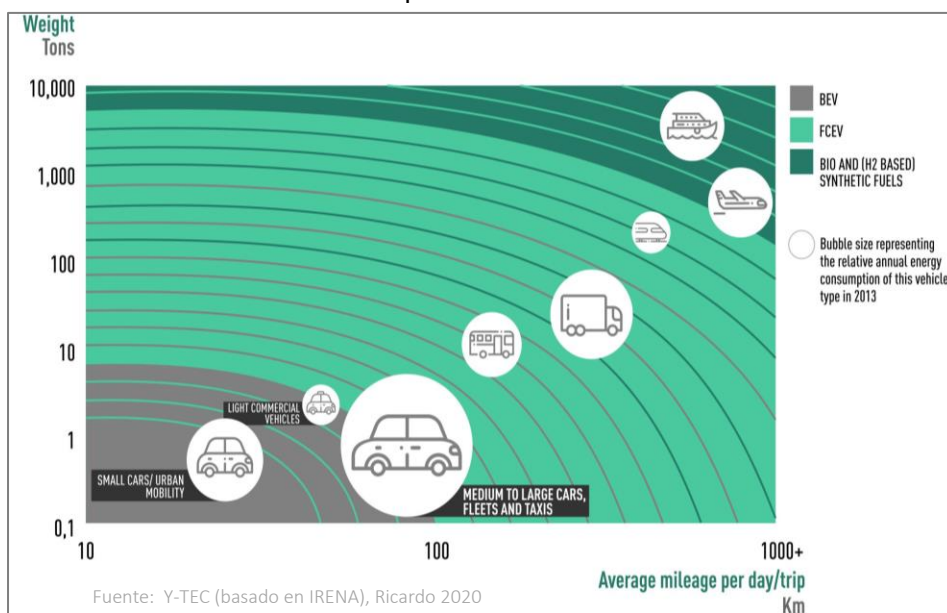


Fuente: Ubogui, J. (2021).

Otro de los aspectos en el que todos los expositores coincidieron es que los sectores donde los vehículos a celda de combustible van a tener oportunidades son los que tienen rangos de autonomía elevados y cargas de transporte elevadas:

- A menor peso y distancia, los vehículos puramente a baterías se impondrían.
- A medida que aumenta la distancia de recorrido anual y la carga de ese recorrido empiezan a ser más rentables en términos de TCO los vehículos a celda de combustible, escenario que se alcanzará en algunos años.

Gráfico 8. Oportunidades en los sectores con rangos de autonomía elevados y cargas de transporte elevadas



Fuente: Ubogui, J. (2021).

De este modo:

- En los sectores más pesados, como los barcos y los aviones, hay oportunidades, principalmente para el transporte aéreo. Por ejemplo, se destacó que Airbus ya trabaja en el desarrollo de aviones 100% a hidrógeno.
- Los trenes también presentan un gran potencial porque trabajan con grandes demandas de recorrido y grandes cargas, sin presentarse la dicotomía de la infraestructura de carga, por tener una vía ya definida.

A nivel de nichos también se destacó que:

- Celdas PEM ya se utilizan en transporte aéreo, específicamente en drones y aviones no tripulados (ganan fuertemente en autonomía).
- Varios expositores mencionaron el desarrollo en autoelevadores como nicho de aplicación muy grande de celdas PEM en electromovilidad (por ejemplo, en los EEUU ya hay un desarrollo importante).
- Finalmente, también se mencionó que en Europa se está experimentando con pequeñas flotas de taxis, de entre 20 y 30 vehículos, funcionando a hidrógeno, ya que son vehículos con mucho recorrido.

Oportunidades en el gas natural (*blending* de hidrógeno limpio con gas natural)

Una oportunidad muy destacada en el Ciclo se relaciona con las ventajas que tenemos en gas natural frente a otros países del mundo. Se destacó que Argentina cuenta con:

- infraestructura disponible, con más de 2.000 puntos de carga de GNC,
- un parque automotor con alrededor de 1.600.000 vehículos habilitados en el año 2020,
- y un volumen (2.479 MSm³/año) de consumo ya establecido de GNC. Es un mercado establecido y conocido por los usuarios.

Considerando que toda la economía del hidrógeno está siendo traccionada por una necesidad de descarbonización, los expertos señalaron que, con la cantidad de vehículos habilitados en la argentina y el volumen de gas señalado, si se hiciera un porcentaje de *blending* en energía con hidrógeno se podría reducir una gran cantidad de CO₂ al año (porcentaje en la energía del hidrógeno respecto a la energía del tanque de gas natural que tiene ese vehículo). Como ejemplo, algunas estimaciones afirman que con solo un 1% de

blending se reducirían unas 49 kilotoneladas por año de CO₂ y con 10%, unas 497 kilotoneladas por año (en progresión lineal).

Se destacó que existen usos de lo que es el hidrógeno mezclado con el GNC y que el país más avanzado es la India, donde ya aprobaron a nivel del Ministerio de Transporte hasta un 18% de *blending* en volumen.

De todos modos, si Argentina quiere aprovechar esta oportunidad, en cuestiones relacionadas con los vehículos que cargan la mezcla de hidrógeno y gas, se destacó la necesidad de avanzar en:

- La validación (entre las automotrices y los tecnólogos que hacen las adaptaciones a GNC) de los límites que se pueden alcanzar sin hacer cambios en la infraestructura de carga, porque el hidrógeno debería ser producido in situ y “blendeado” *in situ* con un electrolizador de muy baja potencia (en las propias estaciones de carga de gas).
- La adaptación de la normativa/regulación que habilite los sistemas de carga y generación in situ de hidrógeno en las estaciones de carga. En este aspecto se mencionó que hay posibilidades de implementar rápidamente pruebas piloto por ejemplo en corredores ruteros.
- La instrumentación de incentivos al desarrollo de mercado de un nuevo producto premium bajo en carbono voluntario, ya que hoy será más caro pegando negativamente en el TCO, pero impactando muy positivamente en la descarbonización.

En el Ciclo se presentó la experiencia de la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado que está pasando de su labor experimental a una fase pre-industrial. En esta fase, estiman que podrían producir 1.600 m³ de hidrógeno (unos 11 tubos de H₂ por hora) para que una vez mezclado con GNC se pueda abastecer a mínimamente 200 vehículos diariamente.

Según las estimaciones de costos del hidrógeno como combustible brindadas por expertos de esta planta piloto, en etapa experimental y una vez amortizado el costo del equipamiento y demás, el costo del combustible híbrido (GNC + H₂) sería un 40% menor en relación al full GNC.

También destacaron la importancia de trabajar en torno al tema normativo y de la regulación: En agosto de 2006 se promulgó la Ley Nacional 26123, "régimen para el desarrollo de la tecnología, producción, uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía", pero todavía no fue reglamentada (aunque, como surge de otras charlas, se estaría avanzando en esa dirección).

Consortio H2ar – Transporte ferroviario, gas natural e indicadores

En relación con el trabajo colaborativo que se viene desarrollando desde el Consorcio H2ar se destacó que una de las ocho células de trabajo articuladas en el aspecto técnico por Y-TEC se vincula a la movilidad y que, entre los 6 proyectos que poseen en cartera actualmente, se destaca el “Recambio de propulsión diésel por celdas de combustibles a hidrógeno en locomotoras de larga distancia”.

Del mismo participan: Y-TEC; el Centro Nacional de Desarrollo e Innovación Ferroviaria (CENADIF); la Subgerencia de Desarrollo y Normas Técnicas (DNT) - Trenes Argentinos Operaciones; la Gerencia Comercial y Explotación de Activos Ferroviarios y la Gerencia de Planeamiento Estratégico - Trenes Argentinos Infraestructura; y la Unidad de Coordinación de Proyectos y Operaciones Ferroviarias - Trenes Argentinos Capital Humano.

En este momento, a través del proyecto se analizan dos propuestas con 2 tecnologías diferenciadas para desarrollar una locomotora prototipo:

- Primera propuesta: Adaptación de locomotora diésel – a eléctrica para funcionar con celdas de combustible y batería. En este caso, se está avanzando en el trabajo técnico vinculado a la recopilación de información y la generación de un anteproyecto de ingeniería, con un presupuesto que permitirá estimar cuánto cuesta y cuantos recursos se requieren para convertir la locomotora en una locomotora a celdas de hidrógeno.
- Segunda propuesta: Adaptación de locomotora diésel – a eléctrica para su utilización con sistema de inyección de hidrógeno en el motor de combustión interna.

Ambas propuestas constituyen desafíos de largo plazo, pero el objetivo prioritario es lograr un aprendizaje sobre estas tecnologías del hidrógeno, para apropiarse y conocer en profundidad las mismas a efectos de aprender efectivamente cómo se maneja el hidrógeno dentro del ámbito ferroviario en cuestiones operativas y de seguridad.

Trabajan pensando en que Argentina forme parte del grupo de países que dominan la tecnología, haciéndolo desde el conocimiento que tienen desde el sector ferroviario junto a socios que aportan conocimiento y experiencia en el tema de los combustibles que dominan la tecnología (Y-TEC). Se espera avanzar con una propuesta económica y ejecutar el proyecto para lograr el desarrollo de una locomotora prototipo que ya está definida.

Se destacó que el proyecto trabaja sobre los siguientes ejes en relación al hidrógeno:

- Adaptación de sistemas, equipos y componentes: Adaptación de todos los elementos vinculados a la construcción de prototipos propulsados a hidrógeno, que dan la posibilidad de entender cómo se vinculan con el material rodante y se desarrollan los

elementos de interface. Esta adaptación brinda una serie de conocimientos muy importantes a la hora de generar los artefactos, generar los sistemas y productos vinculados a esta tecnología del hidrógeno.

- Análisis de la performance del producto: generados los prototipos y artefactos que componen el sistema, se puede probar la performance del producto y entender su funcionamiento en la vida real, entendiendo sus necesidades y limitaciones operativas.
- Detección de potencialidades de desarrollo, sobre todo en el conjunto de elementos que rodean al producto final.
- "Producto ampliado": Cuando uno habla de un producto que está dentro de la economía del hidrógeno, hay una serie de elementos conexos (por ejemplo, los sistemas de abastecimiento de combustible para la locomotora, sistema de repuestos, sistemas de seguridad, etc.) que tiene que ver con cómo se maneja ese producto en la realidad operativa cotidiana. Es un aspecto que da la posibilidad de aprender que algunos de estos elementos constituyan, quizás por sí mismos, adelantos tecnológicos para la región o a otros países con una necesidad similar en términos tecnológicos (desafío de largo plazo).

En relación al *blending* de gas natural con hidrógeno, el Consorcio considera una oportunidad muy viable la creación de un mercado interno para impulsar el despegue de la producción de hidrógeno a escala en el país por medio del mercado del gas verde (*green gas*).

Finalmente, dado que las oportunidades para electrificación en términos de movilidad se van a dar a diferentes velocidades en las distintas regiones del mundo, desde el Consorcio H2ar también desarrollan un portafolios de indicadores que sirven para entender cuando se dan las oportunidades y cuáles son las medidas que se deberían tomar para aprovecharlas. Esto se hace no solo para el sector de movilidad sino para otros sectores también en el marco de toda la economía del hidrógeno en general.

5. Oportunidades y desafíos en la producción y usos industriales del hidrógeno

Si bien la movilidad se presenta como uno de los sectores de mayor dinamismo para traccionar el desarrollo de tecnologías asociadas al hidrógeno en toda su cadena de valor, cuantitativamente la producción y consumo del hidrógeno continúa bajo predominio de las industrias tradicionales. En efecto, en el mundo actualmente se producen cerca de 115 MM de toneladas de hidrógeno al año. De ellos, 70 MM de toneladas es purificado y aplicado mayoritariamente a refinación de petróleo y a la síntesis de amoníaco (fundamentalmente

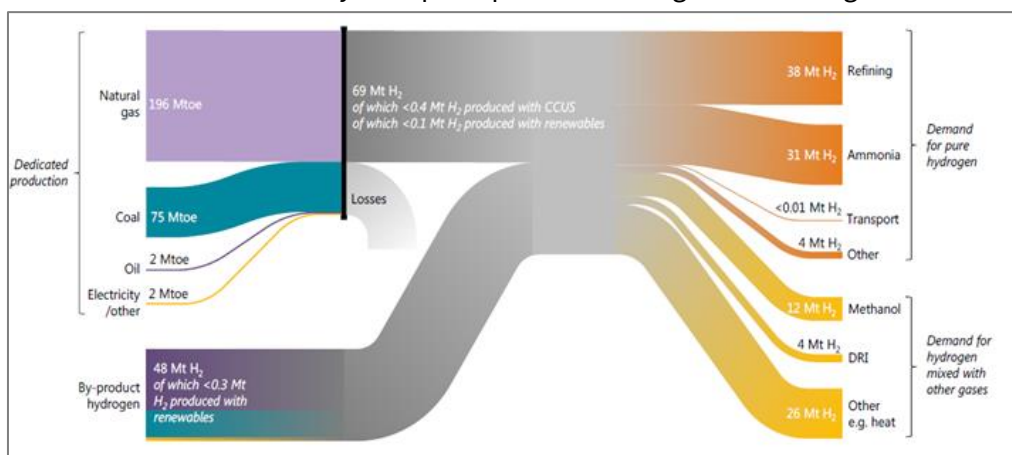
para fertilizantes). Las restantes 45 MM de toneladas se producen sin purificación para otros usos, entre ellos combustible para movilidad.

En esta sección se presentarán los principales aspectos técnicos y conceptuales desarrollados por los expertos convocados en el marco del Ciclo, subrayando contenidos vinculados al estado de situación del sector en Argentina y a la identificación de espacios de oportunidad para el país.

Producción y usos del hidrógeno en la industria petroquímica

Como se observa en la figura adjunta, en términos de generación de hidrógeno, las fuentes fósiles son actualmente las predominantes, en particular el gas natural, seguido por el carbón (a través de la gasificación) y el petróleo. La producción por vía renovable o con procesos con captura y utilización o almacenamiento de carbono es todavía muy poco significativa. Por otra parte, como muestra la ilustración, sí es muy significativa la producción de hidrógeno como subproducto de otros procesos.

Gráfico 9. Fuentes y usos principales del hidrógeno a escala global



Fuente: Borio, D. (2021).

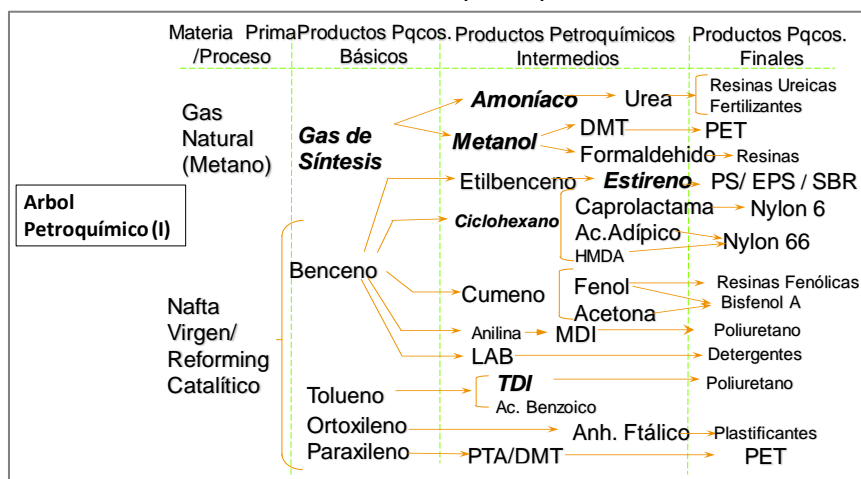
De entre los sectores que utilizan industrialmente al hidrógeno se destaca la industria petroquímica. Podemos afirmar que el petroquímico constituye un sector clave para la economía del hidrógeno por varios motivos, entre ellos por sus significativos volúmenes de producción, pero también porque presenta la particularidad de ser no sólo productora de hidrógeno sino también consumidora.

En primer lugar, es preciso señalar que los productos petroquímicos se obtienen básicamente a partir de petróleo y gas natural, y que se pueden dividir en tres grandes familias: básicos, intermedios y finales. A su vez, los básicos, de interés en materia de producción de hidrógeno en esta industria, se dividen en tres grupos: gas de síntesis, aromáticos y olefinas. Puntualmente, los especialistas destacaron que la producción de gas

de síntesis es la mayor fuente de provisión petroquímica de hidrógeno. La segunda fuente es la que produce hidrocarburos aromáticos y la tercera es la coproducción por vía del craqueo a vapor de los hidrocarburos (*steam cracking*).

La siguiente figura muestra una sección del árbol petroquímico, en el cual se ilustran las principales ramas donde se produce o consume hidrógeno (**en negrita**).

Gráfico 10. Árbol petroquímico



Fuente: Friedlander, A. (2021).

A continuación, se presentan los procesos destacados por los expertos que dan lugar a la producción de hidrógeno. El principal interés reside en mostrar tanto la variedad como la especificidad de cada uno de ellos:

- Gas de síntesis y derivados: Ya se ha mencionado la relevancia de la producción de gas de síntesis en la producción de hidrógeno. En este sentido, los especialistas destacaron que una vez producido el gas de síntesis es posible separar sus componentes y obtener hidrógeno puro. A fin de aproximar la otra cara, la del consumo del hidrógeno por esta industria, cabe señalar que con ese hidrógeno junto con nitrógeno se puede producir amoníaco (síntesis del amoníaco) y también metanol a partir de la reacción del hidrógeno con el monóxido y el dióxido de carbono (síntesis de metanol).
- Reformación de hidrocarburos con vapor de agua: En el caso más común, la reformación de hidrocarburos con vapor de agua produce monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Reformación catalítica de naftas (*reforming*): Produce aromáticos en un proceso que parte de la llamada nafta virgen, en el que también se produce hidrógeno.
- Olefinas: Como se mencionó anteriormente, las olefinas integran la familia de los productos petroquímicos que denominamos “básicos”. Lo más relevante a los fines

de este informe es que en el proceso de producción de uno de ellos, específicamente etileno a partir del etano, se coproduce hidrógeno.

Cabe subrayar que desde el punto de vista cuantitativo la del gas de síntesis es la familia que mayor cantidad de hidrógeno produce, pero también consume, porque prácticamente todo el hidrógeno que se produce como gas de síntesis se destina al amoníaco y al metanol.

También se presentó el espacio para que los especialistas brinden su diagnóstico local y la identificación de oportunidades estratégicas para el país. En este sentido, se precisó que la capacidad petroquímica de América Latina en su conjunto son 80 millones de toneladas, lo que representa un 4% del total mundial. Esto pone de manifiesto que, en términos relativos, la petroquímica no está muy desarrollada en la región. De hecho, sólo hay 5 o 6 países con industria petroquímica, destacándose Brasil, luego Venezuela y Argentina, en tercer lugar.

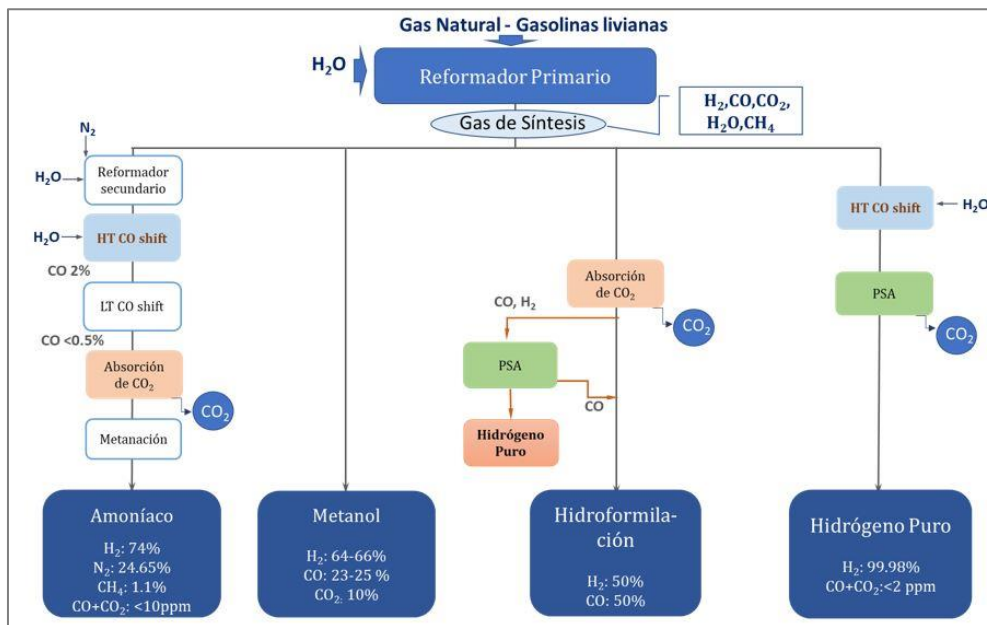
En lo referente al comercio exterior, Argentina es levemente superavitaria en términos de hidrógeno en esta industria. En gas de síntesis, estamos prácticamente en balance, debido a que lo que se produce de hidrógeno se utiliza casi todo para la producción de amoníaco y minoritariamente de metanol. En aromáticos hay superávit, del orden de las 30 mil toneladas por año. También de olefinas, superávit que asciende en este caso a 45 mil toneladas. Por lo que entre 70 y 80 mil toneladas por año es toda la producción remanente de hidrógeno. De modo que es una industria que proporciona poco hidrógeno en términos netos, puesto que mucho del que provee lo consume produciendo amoníaco y metanol.

Finalmente, los especialistas coincidieron en que industrialmente no sólo la petroquímica produce hidrógeno, sino también las refinerías, en volumen tanto o más importante que la petroquímica.

Derivados del hidrógeno en la industria: amoníaco y fertilizantes

Como se puede advertir, son varias las tecnologías empleadas en la producción de hidrógeno. No obstante, el reformado de gas natural es el proceso predominante, motivo por el cual fue objeto del mayor análisis. En el siguiente diagrama se ejemplifica la producción por gas natural, a través de cuatro procesos en los cuales el gas de síntesis opera de paso intermedio.

Gráfico 11. Procesos de producción de hidrógeno por reformado de gas natural



Fuente: Borio, D. (2021).

De entre los productos finales de los procesos ilustrados en la figura presentada, no sólo es de destacar la producción de hidrógeno puro sino también la de amoníaco, ya que cerca del 40% de la producción de hidrógeno ad-hoc en Argentina se destina a la producción de este gas.

Antes de adentrarnos en lo relativo a fertilizantes, es preciso señalar que el árbol del amoníaco tiene muchos derivados, algunos de ellos vinculados al transporte de hidrógeno, pues hay expectativa de comenzar a utilizar el amoníaco como *carrier* para transportar hidrógeno, dotándolo de una densidad energética mayor (se podría licuar relativamente fácil), con la posibilidad de *carckearlo* en destino para generar hidrógeno y nitrógeno. En efecto de acuerdo con la opinión de los expertos, el amoníaco licuado también se plantea como una de las posibles opciones de exportación de hidrógeno con mayor densidad energética. De cara a estas oportunidades del mercado internacional, y en línea con las tendencias globales, la industria química local deberá abordar estrategias de descarbonización de sus procesos más profundas que las actuales.

Fertilizantes nitrogenados

Dada su relevancia, los expertos se enfocaron en la producción de amoníaco y de fertilizantes nitrogenados en Argentina. Para la década 2010-2019, el consumo aparente de amoníaco en Argentina (la suma de lo que se produce más lo que se importa menos lo que se exporta) ha tenido un crecimiento del 2,19% por año de punta a punta. La balanza comercial ha sido

levemente superavitaria, con 11,6 millones de dólares por año, siendo las empresas Profertil (en Bahía Blanca) y Bunge Argentina (en Campana) los productores locales.

La mayoría del amoníaco que se produce es cautivo, puesto que se utiliza para producir urea, que es un fertilizante cuyo consumo ha crecido a razón de 5% anual desde 2010 a 2019 y ha tenido una balanza comercial promedio deficitaria, de -76 millones de dólares por año, en el mismo periodo. A pesar de que el país tiene una producción importante no se cubre el consumo local. En este caso, la empresa Profertil es la única productora local, la cual tiene entre sus planes duplicar su producción, lo cual cubriría el consumo local y dejaría remanente para exportar.

Al margen de la urea, un dato muy relevante es que la balanza comercial de los fertilizantes nitrogenados en general ha sido deficitaria por más de 650 millones de dólares anuales en promedio en el período 2010-2019. Es particularmente deficitaria en los fertilizantes fosfatados, en los cuales no hay producción local.

En el Ciclo se señaló que Argentina sigue incrementando su producción agrícola, y algunos productos, como el maíz, son grandes consumidores de fertilizantes. En ese contexto, como la producción no ha ido acompañando el consumo, el déficit se ha ido agravando. La propuesta es incorporar el reemplazo de esos productos finales como una estrategia, pensando que los fertilizantes son derivados del hidrógeno de segunda generación. Es preciso comprender que el país produce hidrógeno para generar metanol, urea y otros productos, pero a su vez importa grandes cantidades de hidrógeno bajo la forma de fertilizantes, no porque el mismo tenga hidrógeno, sino porque el hidrógeno fue generado para generar amoníaco con el cual se elabora el fertilizante que los productores agrícolas del país adquieren.

Los especialistas marcaron también que, para la producción de las cantidades adicionales de amoníaco requeridas, sería factible utilizar tanto los sistemas tradicionales basados en gas natural, como también otras fuentes de hidrógeno de origen renovable (electrólisis de agua, biomasa, biogás, bioetanol).

Capacidades instaladas: PLAPIQUI

Es preciso señalar que Argentina cuenta con grupos de investigación y capacidades instaladas para el desarrollo tecnológico en la temática. Específicamente, en el Instituto de Investigación PLAPIQUI (CONICET – Universidad Nacional del Sur) se desempeña el grupo de reactores químicos, que hace casi tres décadas viene llevando adelante diferentes líneas de investigación y desarrollo en procesos tales como síntesis de amoníaco, reformado, *shift*, eliminación preferencial de dióxido de carbono, metanación, entre otros. Es de destacar que para ello emplean reactores no convencionales y que también realizan trabajos de transferencia con la industria.

Hidrógeno verde y bajo en carbono: aportes del INTI hacia el sector productivo

El INTI tiene un rol muy importante por jugar en el desarrollo de la economía del hidrógeno en el país. De hecho, hace varios años se encuentra trabajando sobre esta temática. Puntualmente, en lo que refiere a usos finales como puede ser la industrialización del hidrógeno en el marco de un plan de descarbonización o el posible acceso a mercados de exportación, la certificación de origen del hidrógeno verde y del hidrógeno bajo en carbono, es particularmente relevante. De acuerdo con los especialistas, la certificación de origen brinda transparencia al cliente y al consumidor, mejora el modelo de negocio y es muchas veces una condición para comercializarlo. En suma, podemos afirmar que se trata de una condición para traccionar la creación de un mercado para el hidrógeno.

En concreto, el INTI se está preparando para tener la capacidad de realizar la certificación de origen del hidrógeno verde y bajo en dióxido de carbono. Para ello adopta como modelo un esquema desarrollado por el consorcio CertifHy, de la Unión Europea, que abarca la definición del hidrógeno verde y del hidrógeno bajo en carbono, junto con una propuesta detallada para su garantía de origen y una hoja de ruta para su implementación. Elegir un sistema de certificación con validez internacional tiene la ventaja de facilitar el desarrollo del mercado de exportación de hidrógeno.

El desarrollo de la capacidad de certificación en INTI se llevará a cabo a través de un protocolo de certificación (sistema de tipo 6) que incluya la evaluación de la fracción de la energía renovable utilizada en el proceso de producción de hidrógeno y la evaluación del impacto ambiental en cuanto al análisis de emisiones del dióxido de carbono equivalente, contemplando todo el ciclo de vida, desde la generación de electricidad, la producción de hidrógeno, su transporte, su distribución y su aplicación final.

Aportes para el sector productivo

La intención de INTI es desarrollar todo un conjunto de capacidades que puedan respaldar y promover el desarrollo de una cadena de valor del hidrógeno en Argentina.

Estas capacidades son muy variadas y abarcan los siguientes aspectos:

- Cuestiones metodológicas necesarias para las especificaciones de producto: pureza del hidrógeno, composición de mezclas del hidrógeno con GNC, etc.
- Desarrollo de la normativa en lo respectivo a vehículos alimentados con hidrógeno en celdas de combustible y, particularmente, alimentados con mezclas de hidrógeno y GNC.
- Desarrollo de normativa vinculada a diferentes aspectos de la seguridad vinculados al hidrógeno.

- Desarrollo de una industria del hidrógeno con contenido nacional a partir del desarrollo y fabricación de electrolizadores y aplicaciones del hidrógeno como combustible.
- Continuidad de actividades de I+D en electrolizadores de diferentes tecnologías (tecnología líquida alcalina, alcalino de membrana y de óxido sólido). Es preciso mencionar que el equipo del INTI desarrolla también los materiales, especialmente membranas poliméricas y electrocatalizadores.

Respecto a este último punto merece destacarse el grupo de investigación que se encuentra llevando adelante una cooperación con la Universidad de Córdoba y la Universidad de Catamarca. El propósito es desarrollar una opción comercial, motivo por el cual se encuentran interactuando con industrias con la perspectiva de que pueda materializarse la transferencia de esa tecnología, puntualmente la alcalina líquida, que es la más madura y comercial en la actualidad.

Planta experimental de Hidrógeno de Pico Truncado

En el Ciclo se presentó la experiencia de la Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado en la provincia de Santa Cruz. Se trata de una planta eólica de hidrógeno que pertenece a la municipalidad y fue fundada en 2005, siendo la primera de su tipo en América Latina. Actualmente se encuentra transitando una etapa de reconversión que les permitirá producir a escala semi-industrial.

La iniciativa fue originariamente fruto de una apuesta local por incorporar energías renovables a la matriz energética, comenzando con la instalación de dos aerogeneradores que ya en 2005 pasaron a ser cuatro. En 2003 se materializa el interés por la producción de hidrógeno a partir de la celebración de un convenio entre la municipalidad y la Asociación Argentina de Hidrógeno. A principios del año 2005 se obtiene por primera vez hidrógeno mediante la vía electrolítica. A finales de ese mismo año se inaugura la planta experimental con la finalidad de consolidarse como una escuela-fábrica, con fuerte interés en la formación de recursos humanos.

La experiencia ilustra y ejemplifica la necesidad de articulación y de la consistencia de los esfuerzos. También la importancia de que el marco normativo y regulatorio acompañe, destacándose en este caso la sanción de la Ley Provincial 2.756 de promoción del hidrógeno y el Decreto Provincial 1353/2005 que crea el Programa Provincial del Hidrógeno. No obstante, a fin de completar el panorama, es preciso mencionar que aún se aguarda por la reglamentación de la Ley nacional 16.123 del 2006.

En lo que respecta a producción de hidrógeno, la planta cuenta con una sala de electrólisis, un taller mecánico donde se realiza la conversión vehicular y un sector de

compresión y almacenaje, que posibilita mezclar GNC con hidrógeno. En efecto, es de destacar que la principal línea de producción e I+D aspira a la escala semi-industrial de producción de hidrógeno y posterior mezcla con GNC para el abastecimiento de vehículos. En la etapa experimental se estimó que el *blending* de hidrógeno y GNC podría costar un 40% menos que el GNC puro. Cabe mencionar, por otra parte, que el departamento de Pico Truncado posee abundantes yacimientos de gas, con lo cual la propuesta cobra aún más relevancia estratégica.

Objetivos planteados para el pasaje a etapa semi-industrial

- Producir 1.600 m³ de hidrógeno para que una vez mezclado con GNC se pueda abastecer a, al menos, 200 vehículos diariamente.
- Producir por vía electrolítica 800 m³ de oxígeno, con el objetivo de usarlo en forma medicinal. A tal fin se han establecido contactos con la ANMAT para certificar el proceso.
- Producir 20 bidones de 20 litros diariamente de agua para consumo en las plantas de ósmosis a partir de un pozo de extracción de agua propio.
- Generar y afianzar acuerdos entre las plantas y las distintas instituciones, empresas y universidades para avanzar en el conocimiento de las aplicaciones de esta nueva forma de energía.
- Capacitar y apoyar las investigaciones y todo lo relativo al almacenamiento y uso del hidrógeno como vector energético limpio y sustentable.

Producción de hidrógeno y circularidad de procesos

En cuanto a la producción de hidrógeno por la vía electrolítica, desde la fundación de la planta hasta el año 2015 se trabajó experimentalmente con un electrolizador. El producto se ha usado en quemadores catalíticos, en hidruros, e incluso han trabajado en experiencias para calefaccionar. Actualmente cuenta con un electrolizador para producir a escala semi-industrial, que permitirá comenzar a dar respuestas a las demandas de hidrógeno verde que han comenzado a aparecer.

Por otra parte, el centro también tiene dos plantas de ósmosis inversa de ultrafiltración que tratarían el agua para el proceso del electrocatalizador. De modo que se trata de un proceso con características circulares, fundamentalmente teniendo en consideración que está previsto utilizar el excedente en calor generado por el electrolizador como subproducto para elevar la temperatura del agua a fin de calefaccionar un invernadero en el cual ya se han producido hortalizas, frutas, flores de rosas, etc. Esto pone en evidencia que proyectos verdes de índole local de estas características pueden también dar respuestas a desafíos de producción de alimentos a partir de un aprovechamiento integral de la energía.

6. En resumen: principales capacidades, potencialidades y desafíos para la Argentina

A modo de resumen, en este apartado final se busca estilizar y resumir los principales emergentes relacionados con las capacidades existentes, los espacios de oportunidad y/o desafíos que enfrenta el país para sumarse a la economía del hidrógeno. Se organizan de acuerdo con la estructura de contenidos dispuesta en las diferentes jornadas del Ciclo, en línea con los distintos eslabones que componen la cadena de valor.

Oportunidades y desafíos en la producción de hidrógeno

- Argentina cuenta con una gran capacidad de desarrollar tecnología de producción de hidrógeno (en todos los tipos), verificándose la existencia de numerosos grupos en el país que están trabajando para avanzar en este sentido, como ser la Universidad Nacional de Córdoba, la Universidad Nacional de La Plata, la Universidad Nacional del Litoral, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, la Comisión Nacional de Energía Atómica, la Facultad de Ciencia Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires y el Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- En la actualidad la tecnología más difundida y madura en la producción de hidrógeno es el reformado de metano que, teniendo la ventaja de la gran escala, emite dióxido de carbono a la atmósfera y produce el denominado hidrógeno gris. Sin embargo, mediante la incorporación de tecnologías de captura de este carbono, se produce el denominado hidrógeno azul, mitigando/evitando la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- La producción de hidrógeno azul permitiría avanzar rápidamente en la instalación/posicionamiento del hidrógeno como vector energético, operando como tecnología de transición hacia la producción de hidrógeno verde en forma confiable y madura. Las mayores oportunidades para Argentina se asocian a: i) la posibilidad de utilizar las fuentes de hidrógeno que ya hay disponibles hoy como excedentes de la industria química y petroquímica (generan excedentes de hidrógeno que podrían ser capturados y utilizados rápidamente) y ii) utilizando las amplias reservas de gas natural de Vaca Muerta para producir hidrógeno gris, revalorizándolo a través de la obtención de hidrógeno azul.
- La tecnología de electrólisis del agua, alimentando la electricidad necesaria mediante energías renovables, permite producir el denominado hidrógeno verde, con un enorme potencial en el país debido a contar con inmejorables condiciones tanto en

irradiación solar (para el aprovechamiento fotovoltaico) como en sus vientos (para el aprovechamiento eólico).

- Algunos espacios de oportunidad en la investigación se asocian con: i) Explorar todas las tecnologías ya que no existe una única tecnología que dé solución a todas las demandas; ii) Analizar y estudiar diferentes parámetros e indicadores de rendimiento tanto del sistema en general (por ejemplo, consumo de energía, costo del capital y de operación y mantenimiento, tamaño del equipo) como del stack (por ejemplo, degradación, densidad de corriente, carga de metales preciosos, etc.); iii) Investigar componentes más eficientes y económicos que permitan tanto mejorar los actualmente utilizados como sustituir por locales aquellos que deben ser importados; iv) Identificar espacios para trabajar en desarrollos locales vinculados a la electrónica de control de los electrolizadores.
- En el Ciclo se destacó la existencia de un proyecto (H₂RVN), con más de un año de desarrollo, impulsado por la provincia de Río Negro en conjunto con el Instituto Fraunhofer (Alemania) para analizar la factibilidad de producir hidrógeno verde a partir de energía eólica y agua. La provincia se propone trabajar con una mirada integral, de desarrollo e industrialización de toda la cadena de valor asociada a la producción del hidrógeno verde (desde la tracción de nuevos asentamientos industriales hasta el involucramiento activo del vasto sector académico asentado en la provincia). Cabe señalar que durante el año 2022 se realizaron avances sustantivos, entre ellos la aprobación de la iniciativa privada (en cabeza de la empresa australiana Fortescue) por la Legislatura provincial y aportes al proyecto de ley de regulación nacional, a la espera de presentación en el Congreso.
- También existen alternativas de producción de hidrógeno menos desarrolladas (algunas en etapa de laboratorio) con antecedentes de investigación en diferentes grupos del país. Una de ellas es la producción de hidrógeno a partir del reformado de bioalcoholes (como el etanol proveniente de la caña de azúcar o de la fermentación de maíz, y el glicerol, obtenido de la producción de biodiesel). Dado que Argentina es productora y exportadora de biodiesel, es un país que cuenta con las condiciones como para considerar este tipo de tecnología como una oportunidad para canalizar esos subproductos y a la vez producir hidrógeno, una fuente de energía limpia y versátil.
- Otra es la producción de hidrógeno a partir de sistemas bioelectroquímicos (BES) para la transformación de aguas residuales en bio-hidrógeno. Es una tecnología aún poco desarrollada, implementada a baja escala en dispositivos que requieren baja energía.

Los desafíos se asocian al estudio de cómo lograr su escalado; a su adecuación a las condiciones y necesidades regionales, en torno a la ciencia de los materiales (por ejemplo, investigando materiales que sean biocompatibles, conductores y de bajo costo), y en especial, asociados al estudio de los microorganismos con los que se trabaja en estos sistemas.

- Finalmente existen antecedentes en el país de grupos que estudian la producción de hidrógeno mediante biomasa (algas). Actualmente es una tecnología aún en desarrollo (de laboratorio) donde la investigación se concentra en las áreas de optimización del cultivo de algas para mejorar los rendimientos y la calidad de la biomasa para los procesos de *downstream*. También se investiga activamente en las cepas a ser utilizadas para optimizar la producción y el rendimiento de hidrogeno; así como en la mejora y optimización de los procesos de fermentación.

Oportunidades y desafíos en el almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno

- El almacenamiento y transporte del hidrógeno es un condicionante de primer orden para su posicionamiento como vector energético. Lo cual cobra particular interés en un país con las características de la Argentina, geográficamente muy extenso y con posibilidades de producción a gran escala en sitios más bien distantes de los centros de consumo.
- Tanto en almacenamiento como en transporte se presentan limitaciones técnicas que actualmente son objeto de investigación a nivel mundial y en la Argentina.
- En lo que respecta al almacenamiento, el hidrógeno constituye una de las dos formas de almacenar energías alternativas (el litio es la otra), con la particularidad de que, además, el hidrógeno es en sí mismo una forma de energía. Con lo cual, el almacenamiento de hidrógeno podría condicionar (potenciando o limitando) la producción de energías renovables.
- Si bien el hidrógeno cuenta con una densidad energética muy alta su densidad volumétrica en condiciones normales es muy baja, lo cual hace a su almacenamiento muy costoso, particularmente en aplicaciones móviles. La motivación principal en términos de desarrollos tecnológicos pasa por incrementar esta densidad volumétrica sin comprometer cuestiones de seguridad.
- Los tipos de almacenamiento se distinguen entre físicos y químicos. Los físicos son los más convencionales, en los cuales se destacan las tecnologías de compresión y de licuefacción, aunque esta última en menor medida en términos de adopción. Las químicas ofrecen un campo de investigación más prometedor.

- Entre las formas químicas se destacan los hidruros, que son compuestos que pueden adquirir densidades gravimétricas de hidrógeno muy altas. Son sistemas para la gestión integral del hidrógeno, ya que no sólo permiten almacenarlo, sino también purificarlo, comprimirlo y extraerlo.
- Argentina cuenta con grupos de investigación y capacidades instaladas para el desarrollo tecnológico en sistemas y materiales formadores de hidruros. El Departamento de Fisicoquímica de Materiales del Centro Atómico de Bariloche hace más de 20 años que se encuentra trabajando en esta línea de investigación. Entre su nutrida producción se destaca el diseño de sistemas complejos y una activa transferencia de tecnología hacia la industria.
- Sus campos de aplicación abarcan la compresión, captura, purificación y almacenamiento del hidrógeno. Cabe señalar que sus desarrollos se encuentran a la vanguardia en materia de sistemas y materiales formadores de hidruros y dan respuestas a problemáticas concretas del sector productivo. Entre los mismos se cuentan diseños de reactores, prototipos de capturas de hidrógeno para la industria nuclear, procesos de recuperación y purificación de hidrógeno para industrias muy demandantes, y diseño de materiales para el almacenamiento y reconversión energética a fin de potenciar el uso de fuentes renovables.
- El transporte de hidrógeno, por su parte, se caracteriza por ser relativamente costoso. De hecho, el propio almacenamiento para transporte supone mayores desafíos que el almacenamiento estacionario, fundamentalmente en términos de tecnologías y maquinarias de alto costo. Entre las formas más destacadas de transporte se cuentan los gasoductos (que presentan severas limitaciones técnicas), los tubos de gas para transporte terrestre, marítimo y ferroviario, las formas líquidas (para distancias de más de 1.000 km) y los líquidos orgánicos como el amoníaco (aún en etapa incipiente).
- En cuanto a la normativa, el transporte de hidrógeno está clasificado como sustancia peligrosa por la ONU. Cada uno de los modos de transporte cuenta con sus propias reglamentaciones o instrucciones técnicas, lo cual impone algunas restricciones a la utilización masiva de nuevos desarrollos. Argentina cuenta con sus autoridades competentes y con el INTI, que cumple el doble rol de autoridad competente en materia de certificaciones, así como también como laboratorio de referencia.
- Hay casos de empresas argentinas que se encuentran realizando desarrollos de alta tecnología para el empleo del hidrógeno en diferentes procesos productivos y de consumo. Estos desarrollos abarcan un conjunto variopinto de soluciones, entre las que se destacan estaciones de recarga de vehículos, tecnologías de licuefacción del hidrógeno para favorecer su transporte y también desarrollos para producir hidrógeno a partir del metano, abundantemente presente en el biogás.

Oportunidades y desafíos en la implementación y utilización del hidrógeno en la movilidad

- Trabajar sobre la concientización de la problemática medioambiental y la necesidad de avanzar en la descarbonización de las emisiones es central como eje tractor de la transición energética hacia opciones alternativas más limpias (reducción rápida de las emisiones).
- Las celdas de combustible se presentaron como una excelente opción de emisión cero que puede reemplazar por ejemplo a los motores diésel pesados para el transporte de carga o pasajeros sin comprometer la productividad.
- Argentina cuenta con capacidades desarrolladas en grupos que trabajan en temas relacionados con la investigación básica y aplicada en celdas de combustible. Estos pertenecen a instituciones muy reconocidas como la CNEA, la UBA, la UNLP y el Centro de Investigaciones Técnicas de las Fuerzas Armadas, entre otras. La CNEA, en particular, tendría las capacidades para trabajar sobre todos los aspectos de la economía del hidrógeno, incluyendo su producción, almacenamiento y sus usos finales, estacionarios y móviles.
- A nivel mundial, el desarrollo tecnológico ya da muestras de la potencialidad asociada a las tecnologías vinculadas al hidrógeno en la movilidad. Se verifican estados de desarrollo importantes (aunque no masivos aún) en trenes ligeros; autoelevadores; buses; camiones y automóviles de pasajeros, y avances en la industria naval, la aviación y ferroviaria.
- Los sectores donde los vehículos a celda de combustible tendrían mayores oportunidades son los que tienen rangos de autonomía elevados y cargas de transporte elevadas. Es decir, a mayores distancias de recorrido anual y peso de esas cargas, empiezan a ser más rentables en términos de TCO los vehículos a celda de combustible.
- La incorporación del hidrógeno en el transporte ferroviario parece tener posibilidades de relevancia. Especialmente en tramos pre-establecidos, readecuando tramos y pasos y desarrollando terminales de carga en las cabeceras de destino.
- En esta línea, se destaca el proyecto impulsado desde el Consorcio H2ar para el “Recambio de propulsión diésel por celdas de combustibles a hidrógeno en locomotoras de larga distancia”. El mismo tracciona una gran cantidad de análisis y estudios técnicos vinculados, entre otros, a la normativa y regulación específica, la adaptación de los sistemas, equipos y componentes, el análisis de la performance del producto, la detección de potencialidades de desarrollo y en torno a lo que se denomina el “producto ampliado” (una serie de elementos conexos como, por

ejemplo, los sistemas de abastecimiento de combustible para la locomotora, sistema de repuestos, sistemas de seguridad, etc.).

- El país, dadas sus características naturales (reservas) y la experiencia que ya presenta en el uso de gas natural en la movilidad, contaría con grandes oportunidades frente a otros países del mundo para la creación de un mercado interno que impulse el despegue de la producción de H₂ a escala por medio del *blending* H₂-Gas Natural (como tecnología de transición). Esto también tracciona la necesidad de avanzar en análisis y estudios relacionadas a las adaptaciones factibles y necesarias y de los límites del *blend* que se pueden alcanzar de modo satisfactorio, la adecuación de la normativa y regulaciones vinculadas a esta posibilidad y sobre cómo se instrumentarían y qué tipo de incentivos habría que impulsar para posicionar esta alternativa (al menos en sus etapas iniciales dado que sería más caro en términos de TCO y muy favorable para la reducción de CO₂).
- El desarrollo e implementación de normas de monitoreo y certificación de consumo de energía en la movilidad, junto a medidas económicas que estimulen estratégicamente el cambio hacia alternativas más limpias, serán fundamentales para lograr la transición. El apoyo desde el Estado en regular adecuadamente los incentivos y actuar como demandante, facilitador de procesos e incluso como promotor global de la industria, serán factores claves para asegurar empuje inicial y la competitividad.
- En términos generales, hay coincidencias en que los desafíos para que se imponga la movilidad eléctrica están relacionados, entre otros factores, a la reducción del costo de la energía (eléctrica o del hidrógeno); a la reducción del costo de la tecnología; al avance en las velocidades de carga (teniendo en este punto el hidrógeno una enorme ventaja vs la alternativa a batería); la relación autonomía-peso, que debe ser competitiva; al desarrollo de la infraestructura de carga y costo de la misma y, finalmente, al trabajo sobre el reciclado de baterías y celdas.

Oportunidades y desafíos en la producción y usos industriales del hidrógeno

- Tanto en Argentina como en el mundo, las industrias tradicionales (petroquímica y refinerías) son, por mucho, las mayores demandantes y productoras de hidrógeno. La generación de hidrógeno en la industria petroquímica se produce fundamentalmente por separación o como subproducto de otros procesos. Entre los primeros se destaca la familia del gas de síntesis a partir del reformado de gas natural, siendo la tecnología mediante la cual mayor cantidad de hidrógeno se produce actualmente.

- Argentina tiene una tradición en la producción de hidrógeno en su industria petroquímica, que es la tercera más importante de América Latina. Sin embargo, cuenta con un superávit de tan sólo 70/80 mil toneladas anuales de hidrógeno, pues mucho de lo producido se consume en la misma industria para la generación de amoníaco y metanol.
- La producción de amoníaco consume hidrógeno, pero también ofrece oportunidades para transportarlo incrementando su densidad energética a partir de procesos de licuefacción. Se presenta como una oportunidad un tanto distante pero factible para Argentina en la medida que se profundicen las estrategias de descarbonización de la industria química local. No obstante, es por la vía indirecta, es decir, en materia de comercio internacional de fertilizantes, donde el país presenta los déficits más importantes de hidrógeno y donde eventualmente deberían redoblarse esfuerzos para incrementar la producción local, dado el peso del sector agropecuario en la matriz productiva del país.
- En la década pasada, Argentina gastó 665 millones de dólares por año en importar fertilizantes. Todos ellos son derivados del amoníaco y éste, a su vez, sintetizado a partir de hidrógeno. El país tiene en este sector la necesidad de sustituir importaciones, produciendo amoníaco a partir de materias primas disponibles localmente. Sería factible utilizar tanto los sistemas tradicionales basados en gas natural como también otras fuentes de hidrógeno de origen renovable.
- Entre las iniciativas a destacar en esta dirección, se encuentra el proyecto de duplicación en la producción de urea por parte de la empresa Profertil, la cual junto con Bunge son las dos únicas productoras de amoníaco del país.
- Argentina cuenta con grupos de investigación y capacidades instaladas para el desarrollo tecnológico en la temática. En el Instituto de Investigación PLAPIQUI, perteneciente a CONICET/Universidad Nacional del Sur, se desempeña el grupo de reactores químicos, que hace casi tres décadas viene llevando adelante diferentes líneas de I+D y vinculándose con la industria.
- El INTI constituye un actor de mucha relevancia para el desarrollo de la economía del hidrógeno en el país. No sólo a partir del desarrollo de la normativa y las certificaciones para acceder a mercados internacionales y garantizar seguridad en los procesos, sino también a partir de sus propios desarrollos tecnológicos, como ser los vinculados a la fabricación de electrolizadores y aplicaciones del hidrógeno como combustible. En este sentido, ha estrechado vínculos con universidades nacionales y la industria con fines de comercialización de sus desarrollos.
- El país cuenta con una experiencia precursora en materia de producción de hidrógeno en toda América Latina. Fundada en el año 2005, la Planta Experimental de Hidrógeno

de Pico Truncado constituye una apuesta del gobierno local en articulación con la provincia y la nación, que además de haberse consolidado como planta-escuela y espacio de experimentación para dar respuesta a desafíos locales, actualmente se encuentra transitando a una producción de escala semi-industrial. Entre otros proyectos, prevé constituirse como una de las experiencias precursoras en la región en aprovisionar y poner en funcionamiento vehículos a combustión alimentados con un *blending* de hidrógeno y GNC.

Bibliografía

Bagnato, Carolina (2021), *Producción biológica de hidrógeno utilizando algas*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Borio, Daniel (2021), *Hacia el uso del hidrógeno en la industria*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Corti, Horacio (2021), *Celdas de combustible: cómo convertir el hidrógeno en energía eléctrica*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Dieuzeide, María Laura (2021), *Producción de hidrógeno mediante el reformado de bio-alcoholes*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Franceschini, Esteban (2021), *Producción electrolítica de hidrógeno*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Friedlander, Alfredo (2021), *Industria petroquímica e hidrógeno*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Medina, Gonzalo (2021), *Hidrógeno verde Río Negro (H₂VRN)*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Meyer, Gabriel (2021), *Desarrollos tecnológicos basados en materiales formadores de hidruro*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Lavorante, María José (2021), *Métodos de obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Rosso, Julián (2021), *Green Efficiency*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Urretavizcaya, Guillermina (2021), *Almacenamiento de H₂*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Ubogui, Joaquín (2021), *Transición energética en la movilidad: oportunidades y caminos hacia la utilización del hidrógeno*, presentación en Ciclo de Encuentros: “Nuevas tecnologías para la transición energética. La movilidad sustentable: oportunidades y desafíos en las cadenas de valor del litio y el hidrógeno”.

Anexo – Listado de expositoras/es del ciclo

Producción de hidrógeno	
Expositor/a	Institución / Empresa
María José Lavorante	Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF)
Esteban Franceschini	Instituto de Investigaciones en Físico-Química de Córdoba (INFIQC)
Marcelo Fermepin	Air Liquide Argentina S.A.
María Laura Dieuzeide	Instituto de Tecnologías del Hidrógeno y Energía Sostenible - ITHES (CONICET-UBA)
María Belén Prados	Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable - IEDS - Sede Bariloche (CNEA)
Carolina Bagnato	Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable - IEDS - Sede Bariloche (CNEA)
Gonzalo Medina	Agencia de Inversiones de la provincia de Río Negro

Almacenamiento, transporte y distribución	
Expositor/a	Institución / Empresa
Guillermina Urretavizcaya	Departamento de Físicoquímica de Materiales (Centro Atómico Bariloche)
Gabriel Meyer	Departamento de Físicoquímica de Materiales (Centro Atómico Bariloche)
Sergio Heredia	Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)
Oswaldo Del Campo	Galileo Technologies S.A.

Uso del hidrógeno como combustible en el transporte y la movilidad eléctrica	
Expositor/a	Institución / Empresa
Horacio Corti	CONICET/CNEA - Centro Atómico Constituyentes
Julio Vasallo	Laboratorio de Control de Emisiones Gaseosas Vehiculares (LCEGV) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (MAyDS)
Mariano Soler	Centro Nacional de Desarrollo e Innovación Ferroviaria (CENADIF) - Ferrocarriles Argentinos Sociedad del Estado
Julián Rosso	Scania Argentina
Daniel Afione	Toyota
Joaquín Ubogui	Y-TEC

Uso del hidrógeno en la industria	
Expositor/a	Institución
Alfredo Friedlander	Consultor en Unisouth
Daniel Borio	Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) - CONICET
Graciela Abuin	Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)
Mabel Herrera	Planta Experimental de Hidrógeno de Pico Truncado

Autoridades y funcionarios/os	
Expositor/a	Institución
Roberto Salvarezza	Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación
Martín Guzmán	Ministerio de Economía
Juan Cabandié	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Fernando Peirano	Agencia I+D+i
Ana Franchi	CONICET
Carolina Vera	Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación
Diego Hurtado	Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación
Alejandro Primbas	Agencia I+D+i
Roberto Rivarola	CONICET
María Sofía Simón	Secretaría de Energía
Rodrigo Rodríguez Tornquist	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Daniel Schteingart	Ministerio de Desarrollo Productivo
Javier Papa	Ministerio de Economía
Gustavo Rinaldi	Ministerio de Transporte
Carola Ramón	Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto
Pablo Sivori	Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto
Eduardo Dvorkin	Y-TEC
Santiago Sacerdote	Y-TEC
Paula Prados	Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)
Fernando Brun	Secretaría de Asuntos Estratégicos
Ulrike Fucks/Alejandro Gesino	Instituto Fraunhofer IEE



Marzo 2023

ISBN 978-987-4193-65-0



9 789874 193650