

Artículo original

Hidrógeno verde: una oportunidad sustentable para el transporte

Green hydrogen: a sustainable transportation opportunity

Jorge E. Eterovic⁽¹⁾; Federico J. Alterini⁽²⁾; Agustín J. Lohigorry⁽³⁾; Gabriel E. Blanco⁽⁴⁾

⁽¹⁾Universidad Nacional de La Matanza
jeterovic@unlam.edu.ar

⁽²⁾Universidad Nacional de La Matanza
fealterini@unlam.edu.ar

⁽³⁾Universidad Nacional de La Matanza
alohigorry@unlam.edu.ar

⁽⁴⁾Universidad Nacional de La Matanza
gblanco@unlam.edu.ar

Resumen:

La descarbonización de la matriz energética es parte fundamental de la agenda mundial ante la amenaza climática. Argentina delinea su ruta hacia un uso de la energía más respetuoso con el medioambiente. El hidrógeno verde está llamado a ser un actor fundamental en un futuro energético atento a la huella de carbono, por sus capacidades para almacenar energía frente a la intermitencia de las fuentes eólicas y solares, por su rol en una movilidad sustentable y también por sus usos industriales. En particular, el transporte pesado y de larga distancia asoma como un candidato natural para el hidrógeno.

Abstract:

The energy matrix decarbonization is a fundamental part of the global agenda for the climate threat. Argentina outlines its route towards a more environmental friendly use of energy. Green hydrogen will be a main actor in the future of energy, paying attention to carbon footprint, due its capacity to store energy against the intermittence of wind and solar sources, its role in sustainable mobility and also for its industrial uses. Particularly, heavy and long-distance transport appears to be a natural candidate for hydrogen.

Palabras Clave: *Hidrógeno, Verde, Transporte, Descarbonización*

Key Words: *Hydrogen, Green, Transport, Decarbonization*

I. CONTEXTO INTERNACIONAL

El mundo avanza hacia la descarbonización de su matriz energética como su principal carta para enfrentar el cambio climático. Otros factores geopolíticos, y de independencia energética, también juegan su rol. En este contexto el hidrógeno verde, como vector de energías “limpias” y renovables, será esencial, y ya es parte de las estrategias energéticas de los países, sin menoscabo de su importancia como materia prima en diversos procesos industriales. La Argentina asumió compromisos de reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero ante la comunidad internacional, y trabaja en su hoja de ruta para el hidrógeno, no solo para cumplir con el objetivo ambiental en el ámbito local, sino también por la oportunidad ante los mercados de exportación que se perfilan. A nivel mundial en 2020 se consumieron cerca de 90 millones de toneladas de hidrógeno, principalmente en procesos industriales y refinerías, casi en su totalidad de origen fósil. El mercado del hidrógeno podría alcanzar 200 millones de toneladas en 2030, y para 2050 superar los 500 millones de toneladas [1].

II. EL HIDRÓGENO EN ARGENTINA

Existen diversos procesos para la obtención comercial del hidrógeno, en la actualidad casi la totalidad del producido en Argentina, y en el mundo, es a través del reformado del gas natural con vapor de agua, cuya reacción libera hidrógeno, pero también dióxido de carbono (CO₂). Así, se desarrollan mecanismos de compensación, por ejemplo forestación, y sistemas para secuestrar, y almacenar, las emisiones no deseadas, con el objeto de obtener un hidrógeno más amigable, con el ambiente, en un mercado que denomina el hidrógeno azul. De este modo podría

pensarse a este último, que en Argentina se apuntalaría en las reservas gasíferas de Vaca Muerta, como un vector de transición hacia un destino de cero emisiones donde el hidrógeno verde está llamado a ser un actor disruptivo (*game changer*). Sin dudas, el desarrollo del hidrógeno azul podrá acelerar infraestructuras, y crear demanda, para cuando el verde encuentre condiciones de rentabilidad para su masificación.

En números del Consorcio H2ar, en Argentina, cada año se producen cerca de 400 kTon de hidrógeno; hoy es posible producir hidrógeno azul con 90% de captura a 1,4 – 1,8 USD/kg considerando un costo del gas natural de entre 3 y 5 USD/Mbtu. El hidrógeno verde podría igualar los costos del azul hacia 2030 en proyectos del orden de 1GW aislado de la red eléctrica (*off-grid*). El costo hasta podría duplicarse en escalas de 100 MW; sin embargo, un mayor grado de interacción con la red eléctrica (*on-grid*), mejoraría el factor de utilización al posibilitar la compra de energía verde a terceros y tendería a igualar el costo. La utilización del hidrógeno azul, con 90% de captura de CO₂, significaría emisiones 66% menores a las de combustionar gas natural vs las cero emisiones del hidrógeno verde [2].

La Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM), a través de su Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, comenzó a investigar el manejo y control del gas de hidrógeno, hace más de dos años, en un proyecto centrado en la investigación sobre controladores de gas para promover el uso, y generación, del hidrógeno a nivel local, al que le valió la declaración de interés legislativo por parte de la Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires [3]. Continuando con el objetivo de contribuir al desarrollo de la economía del

hidrógeno, ahora se procura dar un paso sustancial con la producción de hidrógeno verde con fines de investigación en el predio de su campus universitario, sería la primera planta en territorio bonaerense y una de las pocas a nivel nacional.

La comunidad educativa y científica se verá, sin dudas, fuertemente beneficiada, se adquirirían habilidades necesarias para una eficiente producción, y uso seguro del hidrógeno, el proyecto contribuiría a la expansión, y mejora, de la oferta educativa siendo un punto de apalancamiento para el futuro desarrollo local de la tecnología, o parte de ella. Es un proyecto que trasciende el campo académico, que busca encontrar su legitimidad social en la contribución al medio ambiente, en su colaboración con el sector empresario, y al sector público que, fundamentalmente, deberá jugar un rol relevante para que una Argentina verde, y sustentable energéticamente sea posible.

A los normales desafíos técnicos y de mercado, en Argentina, se suma un contexto de grandes dificultades para acceder al financiamiento, a tasas competitivas, y el peso de los sectores vinculados a la extracción de hidrocarburos, que motorizan el desarrollo del hidrogeno azul como un “hijo” de las reservas gasíferas de Vaca Muerta. Argentina posee las condiciones para producir hidrógeno verde en gran escala, para exportación de energía y para las necesidades locales (Figura 1).

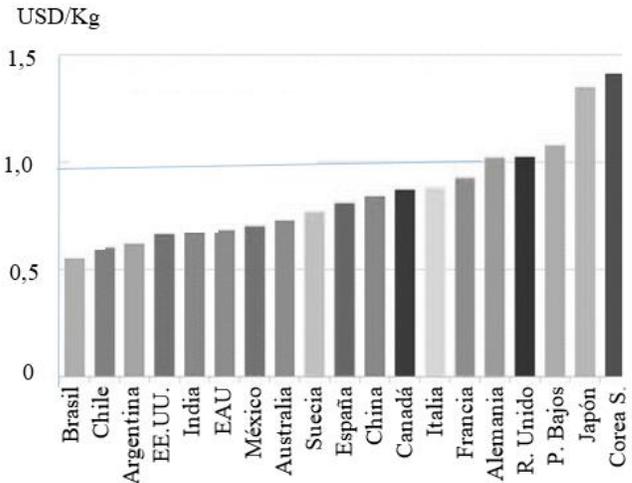


Figura 1. - Costo nivelado de producción de hidrógeno verde (escenario optimista) en 2050. Fuente: Bloomberg, 08/02/2022

En adelante, se enfocará el análisis en los usos del hidrógeno como reemplazo de los combustibles fósiles, y su alternativa frente a las baterías de litio, sin detrimento de su utilidad para la descarbonización de procesos industriales en la producción del acero, del cemento, de los fertilizantes, en la hidrogenación de alimentos, y en aplicaciones de calefacción, entre otros.

III. EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Si bien es cierto que Argentina puede, vía gas natural, fundamentalmente comprimido (GNC), reducir las emisiones de su sistema de transporte [Figura 2], a precios competitivos frente al diésel, no debería desaprovechar la oportunidad estratégica de avanzar hacia la descarbonización, con el hidrógeno como vector, y alternativa vital para que la industria argentina pueda desarrollar tecnologías, y cadenas de suministro.

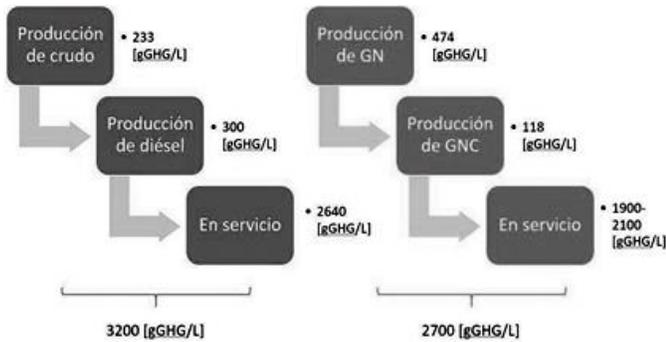


Figura 2. Emisiones para un colectivo urbano, correspondientes al ciclo de vida de diésel versus GNC, en gramos de gases de efecto invernadero equivalentes por litro de diésel equivalente. Fuente: Gobierno Ciudad de Buenos Aires – Buses GNC - Prueba piloto de buses de combustibles alternativos (Julio, 2021)

El hidrógeno para motores, en aplicaciones de transporte, o usos estacionarios, como reemplazo de combustibles fósiles, puede utilizarse de dos maneras. La primera, y más desarrollada, es la de producir electricidad por medio de una pila de combustible, para luego con ella alimentar un motor eléctrico, en este caso con emisiones cero dado que al combinarse con el oxígeno del aire solo genera energía y agua limpia. La segunda, más incipiente en su desarrollo, consiste en su quemado directo en motores de combustión interna. Si bien hay una fuerte mejora en cuanto a emisiones, respecto a combustión de hidrocarburos, dado que no se genera CO₂ ni otras sustancias tóxicas como el dióxido de azufre, continúan presentes emisiones de óxidos nitrosos (NO_x). Para evitar estas últimas emisiones, la industria avanza desarrollando sistemas postratamiento, que permitan eliminarlas en su mayoría, y/o trabajando, sobre la admisión de los motores con relaciones de aire muy superiores a la estequiométrica, a mayor cantidad de oxígeno, menor generación de NO_x [4], entre otras opciones. Es de destacar, que también es posible trabajar con mezclas de combustibles donde el hidrógeno sea una parte, logrando una contribución parcial al ambiente.

Entre los principales desafíos para un desarrollo masivo de la demanda local del hidrógeno verde, se identifican los siguientes puntos,

- El hidrógeno verde, hoy, no es competitivo frente a los combustibles fósiles, ni frente al hidrógeno azul. Es de esperar fuertes reducciones de costos en la generación renovable y en los electrolizadores, por la utilización de materiales menos costosos, particularmente en los de tecnología PEM, y también por la masificación y la automatización de su producción. Hay una larga espera para quien quiera adquirir hoy un electrolizador y la oferta debería reaccionar en ese sentido. Un evento importante sería que el precio de otros energéticos menos limpios internalicen los pasivos ambientales que generan.

- Necesidad de infraestructuras costosas. Aquí el desarrollo es presa de una realidad circular, ¿qué debe estar primero?, ¿la infraestructura o el vehículo a hidrógeno? En la infraestructura se ve claramente la necesidad de que el sector público articule políticas con el sector privado.

- Conversión tecnológica del parque de transporte. Existen posibles puntos intermedios en la transición energética hacia las cero emisiones, y en Argentina, como se comentara, se apalancan en el potencial gasífero de Vaca Muerta, con un mayor uso del GNC, y un fuerte desarrollo del hidrógeno azul. Este último es un creador de mercado para el futuro de todos los hidrógenos.

En este contexto, desde la UNLaM, se procuran realizar pruebas, y contribuir al desarrollo de tecnologías que permitan la utilización del hidrógeno como combustible,

en motores estacionarios, y en el transporte pesado, donde resultaría más competitivo frente a la locomoción a baterías, hoy de litio por autonomía, tiempos de recarga, y una menor exigencia de espacio y peso para su funcionamiento. A su vez, la combustión directa del hidrógeno en motores térmicos podría cobrar relevancia, en países como la Argentina, frente a la pila de combustible, a pesar de un rendimiento energético inferior al del ciclo Otto (27% promedio) [5], vs pila combustible, del 57% [6], por las mayores dificultades para acceder a la tecnología y al crédito.

Caben destacar ciertas particularidades en relación a la locomoción pesada,

1) Transporte pesado de pasajeros

Como se anticipara, el hidrógeno es ventajoso en la movilidad con largo alcance, y cargas pesadas, ya que el hidrógeno gaseoso se almacena a una presión de 350 bar (vs los 700 bar de un vehículo liviano) [7], mientras que el vehículo a celda de combustible (FCEV) es una subcategoría del vehículo eléctrico. En los vehículos eléctricos, la energía generada por la celda de combustible alimenta el motor eléctrico, auxiliado por una batería de mucha menor capacidad que la requerida por un vehículo 100% a baterías. Por otro lado, los motores que combustionan directamente el hidrógeno, se fabrican sobre la base de los de combustión interna convencionales. Para los fabricantes, es una tecnología ya conocida, en el diseño y la producción, de vehículos. Asimismo, es una tecnología familiar para las flotas, tanto para la operación, y el mantenimiento, como para la resolución de problemas y servicio.

Tabla 1. Comparación operativa camiones.

	<u>Camión de 23 Ton de carga</u> 560 km de recorrido		
	Diesel	Hidrógeno (Celda Comb.)	Baterías (Litio)
Carga	265 l	55 kg	900 kWh
Tiempo	5 min	15 min	3,6 horas
Combustible (kg)	230	55	-
Tanque / Baterías (kg)	70	2000	7600
Pérdida de carga útil (%)	1%	9%	33%

Fuente: Decarbonizing Heavy-Duty Transportation - Stanford Univ (Agosto, 2021).

2) Transporte por camión

Los camiones son otra categoría de vehículos donde la tecnología eléctrica de la batería puede que no sea la mejor solución de descarbonización. Las desventajas de la tecnología a batería se encuentran nuevamente en la autonomía medida en kilómetros, y en los tiempos de carga, pero es relevante la fuerte pérdida de espacio, y peso, disponible para la carga. En el transporte de larga distancia, los conductores tendrían que detenerse un largo tiempo para su recarga. Los camiones de hidrógeno, en cambio, tienen un rango de tiempo para el reabastecimiento de combustible comparable al diésel, y al gas natural.

3) Locomoción Ferroviaria

El uso del hidrógeno en el transporte ferroviario supone una alternativa sin emisiones de efecto invernadero, u otros contaminantes, para líneas no electrificadas donde ahora circulan trenes diésel eléctricos. Es una opción que cobra fuerza ante los altos costos de electrificar ramales, sobre todo cuando se encuentran alejados de los tendidos eléctricos troncales. En trenes de pasajeros movilizad

por celda de combustible, hoy se alcanzan autonomías de 1.000 km, frente a los cerca de 100 km en el caso de que fuera alimentado solo por baterías [8]. En el caso de funcionar a celda de combustibles, se necesitarían cerca de 40 kg de hidrógeno para recorrer 100 km [9]. También es posible pensar en alimentar con hidrógeno a las actuales locomotoras diésel eléctricas, que funcionan en Argentina y en el mundo, quemándolo en los motores a combustión interna para generar electricidad en unos alternadores, que luego de rectificarla movilizaría a los motores eléctricos de tracción, al igual que en FCEV hay unas baterías auxiliares para cubrir los picos de potencia.

A modo de referencia, las últimas locomotoras diésel eléctricas adquiridas por Trenes Argentinos para el Belgrano Cargas a la compañía China Railway Construction Corporation (CRCC). en el año 2017, tienen una potencia de 3000 HP y 2200 kW, duplicando a las que reemplazaron, su velocidad final es de 80 km/h. Por su parte el tren a hidrógeno para pasajeros de Siemens, Mireo Plus H, tiene una potencia de 1700 kW y una velocidad máxima de 160 km/h, hoy en pruebas y con servicio regular programado en Alemania para 2024.

4) Transporte por vías navegables

La experiencia mundial en el rubro es aún más incipiente, el hidrógeno con fines de propulsión no ha tenido un desarrollo fuerte. La Hidrovía Paraguay-Paraná puede ser un interesante laboratorio para el desarrollo de la tecnología. Hoy circulan por ella unos 300 remolcadores de empuje, y 50 buques autopropulsados. Los remolcadores de empuje tienen potencias de 4.000 a 6.000 HP, y la mayoría consumen *gas oil*, u otros IFO (*Intermediate Fuel Oil*) indistintamente [10]. El

hidrógeno, por sus virtudes para el ambiente, puede jugar un rol clave en competencia con otros combustibles líquidos, o gaseosos, de origen fósil o renovable, como el biodiésel. Su inclusión en la matriz de combustibles colaboraría en disminuir la huella de carbono de las exportaciones, un valor agregado para un mundo que tiende cada vez más a penalizar el impacto ambiental de las actividades económicas.

IV. CONSIDERACIONES FINALES

Es posible que se esté en la puerta de entrada de una nueva era, donde el hidrógeno será una de las soluciones más prometedoras para reducir emisiones a nivel global. Pero nada de eso será realidad sin condiciones de costo, e inversiones competitivas *per se*, o por beneficios fiscales y ambientales.

Al determinar el precio de venta del hidrógeno, por su equivalente en rendimiento por km recorrido, respecto a un motor térmico a diésel, hoy se obtendría un valor de venta cercano a los 4 USD/kg en EEUU, muy inferior al que actualmente es posible conseguir en las estaciones de servicio de países desarrollados que recorren la transición. En números del Departamento de Energía de Estados Unidos, hoy es factible producir hidrógeno verde, en el país del norte, a un costo de 5 USD/kg, y de cumplirse el objetivo para 2030, ese valor se reduciría hasta 1 USD/kg (*Hydrogen Shot Summit- 2021*). Una mejora importante podría esperarse, entonces, en el precio en surtidor, y volver competitivo al hidrógeno verde para el usuario final en términos de gasto de combustible [Tabla 2]. También será necesaria una caída del precio de los vehículos. En EE.UU., se estima, por ejemplo, que hacia 2025, un camión de carga de 23 toneladas a celda de

hidrógeno quintuplicará en precio de venta a su equivalente a diésel [9]. Beneficios al consumo de energías limpias, o penalidades al consumo de combustibles fósiles, podrán ser parte del menú para una solución que le permita competir al hidrógeno frente al combustible fósil.

Tabla 2. Consumo Camión (EE.UU. - 23 Ton de carga)

	Diésel		Hidrógeno (Celda Comb.)	
Consumo	46	l / 100 km	10	kg / 100 km
Precio *	0.87	USD / l	10	USD / kg
Costo	40	USD / 100 km	98	USD / 100 km

Fuente:

* Diésel: US Energy Information Administration - Average 2021

* Hidrógeno: Decarbonizing Heavy-Duty Transportation - Stanford Univ.

V. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2021*, páginas 5 y 19.
- [2] Consorcio H2ar. *Resumen de Resultados 2021*.
- [3] Universidad Nacional de la Matanza. ReDDi, *Análisis comparativo de sensores para flujo de hidrógeno*.2022.

- [4] Cummins – Sala de Prensa. *¿Cómo funcionan los motores de hidrógeno?* 26 de enero de 2022.
<https://www.cummins.com/es/news/2022/01/26/how-do-hydrogen-engines-work>
- [5] Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla. *Ciclo Otto*. (GIE). 2015.
- [6] Ballard. *Especificaciones de celda de combustible para vehículos heavy duty (Ballard FCmove HD+, Septiembre 2021)*, pág. 2.
- [7] Fundación Naturgy. *Hidrógeno: Vector energético de una economía descarbonizada*, página 267.
- [8] Stanford University. *Decarbonizing Heavy-Duty Transportation (Agosto, 2021)*, pág. 25.
- [9] Instituto Argentino de Ferrocarriles y Asociación Argentina de Hidrógeno. *Hacia un prototipo de Tren Argentino Eléctrico a Hidrógeno*.
- [10] Banco Interamericano de Desarrollo. *Análisis de sustitución de combustibles del sistema de transporte fluvial de la Hidrovía Paraguay - Paraná*.

Recibido: 2022-07-15

Aprobado: 2022-08-01

Hipervínculo Permanente: <https://doi.org/10.54789/reddi.7.1.3>

Datos de edición: Vol. 7 - Nro. 1 - Art. 3

Fecha de edición: 2022-08-10

