

Scenario for Argentina regarding green hydrogen and its derivatives

Eterovic, Jorge E.¹; Blanco, Gabriel E.²; Fauroux, Luis E.³; Alterini, Federico J.⁴; Davis, Nicolás⁵; Pepe, María L.⁶; Salcovsky, Natalia M.⁷

^{1,7}Universidad Nacional de La Matanza, Argentina, eterovic@unlam.edu.ar

Abstract—

The European Green Deal aims for climate neutrality by 2050 and establishes rules for importing products obtained with low or zero carbon dioxide emissions. This opens a window of opportunity for countries with limited global impact due to their emissions, allowing for a balance between exporting "green" products and consuming "grey" ones, within the framework of the agreements signed and the standards accepted by importing countries. These rules are based on the definition of Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO), which establishes strict sustainability and emissions requirements for certifying hydrogen as "green." These requirements apply to both production within the EU and imports, and stipulate that the energy used must come from renewable sources. In addition, there are regulations on the transport and use of hydrogen, as well as the requirement for importers to comply with carbon market rules and the 70% carbon intensity requirement compared to fossil fuels. In the context of the H2/PtX (Hydrogen Power to X) scenario, this work analyzes the characteristics of the current situation in Argentina regarding ammonia and urea, and outlines the strengths, opportunities, weaknesses, and threats it possesses in this scenario with a view to exporting hydrogen and/or its derivatives, obtained thanks to its high capacity for generating renewable energy.

Keywords—*European Green Deal; Green Hydrogen; Non-Biological Renewable Fuels (NBRF); Power-to-X (PtX); Renewable Energy Exports.*

Un escenario para Argentina en relación con el hidrógeno verde y sus derivados

Eterovic, Jorge E.¹; Blanco, Gabriel E.²; Fauroux, Luis E.³; Alterini, Federico J.⁴; Davis, Nicolás⁵; Pepe, María L.⁶; Salcovsky, Natalia M.⁷

^{1,7}Universidad Nacional de La Matanza, Argentina, eterovic@unlam.edu.ar

Resumen— El Pacto Verde Europeo, busca la neutralidad climática para 2050, y establece normas para la importación de productos obtenidos con bajas, o nulas, emisiones de dióxido de carbono. Esto abre una ventana de oportunidad para aquellos países con poca injerencia global en cuanto a sus emisiones permitiendo un balance entre exportar “verde” y consumir “gris”. dentro de los acuerdos suscriptos, y las normas aceptadas, por los países importadores. Estas últimas, se basan en la definición de Combustibles Renovables de Origen No Biológico (RFNBO), que establece requisitos estrictos de sostenibilidad y emisiones para certificar el hidrógeno como “verde”. Estos requisitos se aplican tanto a la producción dentro de la UE como a las importaciones y exigen que la energía utilizada sea de fuentes renovables. A esto se suman normativas sobre el transporte y uso del hidrógeno, así como la necesidad de que los importadores cumplan con las reglas del mercado de carbono y la intensidad de carbono del 70% en comparación con los combustibles fósiles. En el contexto de los Escenarios H2/PtX (Hydrogen Power to X), este trabajo analiza las características de la situación actual, en Argentina, del amoníaco y la urea, y planteando las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que posee en vistas a la exportación de hidrógeno, y/o sus derivados, obtenidos gracias a su alta capacidad de generación de energías renovables.

Palabras clave—Pacto Verde Europeo; Hidrógeno verde; Combustibles Renovables de Origen No Biológico (RFNBO), Power-to-X (PtX); Exportación de energías renovables

I. INTRODUCCIÓN

El hidrógeno es utilizado, entre otras, para la producción de amoníaco, y éste a su vez en la de urea, fertilizantes, metanol, hidrogenación de alimentos, refinación de petróleo, etc. [1]. El hidrógeno (H_2) puede considerarse tanto un combustible, materia prima, o como un vector energético.

El impulso del deseo de promover la transición energética, y la reconversión de su matriz, ya sea a nivel nacional o mundial, choca con la dura realidad del tiempo, por tratarse de un proceso a largo plazo.

Ahora, habida cuenta de los reiterados planteos en las cumbres de Kioto, Río de Janeiro, y París, se ha visto reflejada la necesidad de cambios dirigidos a la sostenibilidad y sustentabilidad de los procesos, tanto productivos, como los hábitos de consumo industrial, y la disposición final de los

residuos, abriendo mercados para el hidrógeno, amoníaco y urea, “verdes”.

II. ESCENARIO H2/PTX (HYDROGEN POWER TO X)

Este trabajo pretende realzar la importancia de concluir las represas, Condor Cliff y la Barrancosa, obras de importancia estratégica para la región y la nación (Fig. 1) [13].



Fig 1. Ubicación de las represas Condor Cliff y La Barrancosa (Santa Cruz) (Fuente: Ministerio de energía y Minería y Río Santa Cruz sus represas/LA NACION)

De esta forma, la inversión para el transporte de energía se limita a la geografía regional, donde se podría llevar a cabo el proceso de electrólisis. Por otra parte, se podrían utilizar los puertos, también regionales, para su exportación, sin depender de gasoductos, o de altas inversiones para su transporte.

El uso del hidrógeno en Condiciones Estándar no es eficiente debido a su muy baja densidad energética volumétrica, del orden de 3Wh/L, generando numerosas desventajas en su almacenamiento. En el caso de automóviles, necesita de una elevada compresión, de alrededor de 700 bar, para que la cantidad almacenada brinde una autonomía acorde a las requeridas por el usuario.

En el caso de pretender transportar el hidrógeno en fase líquida, este debe ser comprimido y enfriado a $-250^{\circ}C$, lo que ha motivado plantear otras alternativas para su almacenamiento a largo plazo, o para su transporte en largas distancias, aquí es donde el amoníaco toma su papel de “energy carrier” o vector energético [2].

Es por esto que el escenario considera al hidrógeno como materia prima para la producción de amoníaco, y éste a su vez puede tomar dos caminos, el primero es ser vector energético exportable, y el segundo como materia prima para la obtención local de urea.

La generación de hidrógeno “verde” in-situ, y la posterior producción de amoníaco para su exportación conforma un escenario de mecanismo H₂/PtX (Hydrogen Power to X) [3], [4], cumpliendo los requisitos de los mercados demandantes de certificación de energía producida con baja emisión de dióxido de carbono.

A su vez, este escenario, aprovecha la calificación de país, en cuanto a su baja tasa de producción de gases de efecto invernadero (GEI), permitiendo el consumo de recursos fósiles en el mercado interno, y de existir sobreproducción, exportar el excedente, para destinar las fuentes limpias a procesos Power To X, como el que tratamos.

III. AMONÍACO VERDE COMO VECTOR ENERGÉTICO

El amoníaco es una sustancia alcalina, incolora y con un fuerte olor, si bien es una sustancia muy peligrosa para la vida humana, ya que su toxicidad es hasta tres veces mayor que en el caso de otros combustibles como el metanol o la gasolina, y que una concentración de 300 ppm es suficiente para atentar contra la salud del ser humano, este compuesto es considerado como un combustible barato respecto a los combustibles convencionales, como podrían ser la gasolina, el gas natural, metanol o el mismo hidrógeno [2].

El amoníaco se caracteriza por su elevada densidad energética volumétrica (12.7 MJ/L), mayor que la del hidrógeno líquido (8.49 MJ/L), o la del hidrógeno comprimido a 700 bar y temperatura ambiente (4.5 MJ/L). Su temperatura de ebullición a presión atmosférica es -33.4°C. Cuenta con un elevado calor de reacción o combustión, con un valor de 11.2 MJ/L, también superior al del hidrógeno, 8.58 MJ/L. Se disipa fácilmente en la atmósfera, debido que su densidad es menor que la del aire (1,7 veces menor), lo cual minimiza las probabilidades de explosión y riesgo de incendios en caso de fuga. Respecto a su inflamabilidad, cuenta con una

temperatura de autoignición elevada (650°C), en comparación con otros combustibles fósiles (alrededor de los 520°C). Asimismo, referido a su concentración, su inflamabilidad aumenta cuando se encuentra en un rango entre el 15- 27%, tanto en aire seco como en aire húmedo. Esto representa una ventaja para su acumulación si se almacena en concentraciones superiores, como podría ser al 100%, condición en la que este riesgo disminuye sensiblemente.

La importancia del amoníaco, además de su uso como almacenamiento de hidrógeno, radica en la fabricación de urea, y fertilizantes. La fabricación de éstos permite sostener aproximadamente un 48% de la población mundial gracias a sus efectos sobre los terrenos arados, aportando nutrientes al suelo y permitiendo así un mayor desarrollo de la cosecha. Dado que el costo del gas natural puede representar hasta el 90 por ciento del costo de la producción de amoníaco [5], la volatilidad de los precios en los mercados internacionales del gas natural se propaga a la industria de los fertilizantes y, posteriormente, a los precios de los alimentos, lo que contribuye a la inestabilidad en los mercados agrícolas [6].

La obtención del amoníaco se realiza mediante el proceso de Haber-Bosch (HB), proceso que es muy ineficiente desde el punto de vista energético.

Por un lado, el hidrógeno para este proceso es obtenido mediante el reformado de metano, mientras que el nitrógeno, se obtiene directamente a partir del aire, mediante una unidad de separación, la que puede realizarse por varios métodos, siendo el método de separación criogénica el más empleado debido a la madurez de la tecnología y su menor costo [7].

La variante propuesta en este proceso es la de implementar la obtención de hidrógeno mediante electrólisis, utilizando energía de origen renovable (hidráulica), lo que aumentaría la eficiencia del proceso, dándole a su vez, la categoría de “verde” al amoníaco producido (Fig. 2)

Desde el punto de vista ambiental, esta variante permite evitar 2 tnCO₂/tnNH₃ producida, sin embargo, serán emitidas entre 0.3-0.6 tnCO₂/tnNH₃ por la combustión del metano que alimenta al compresor, de lo que resulta un ahorro de 1.4-1.7 tnCO₂/tnNH₃ producido [8]

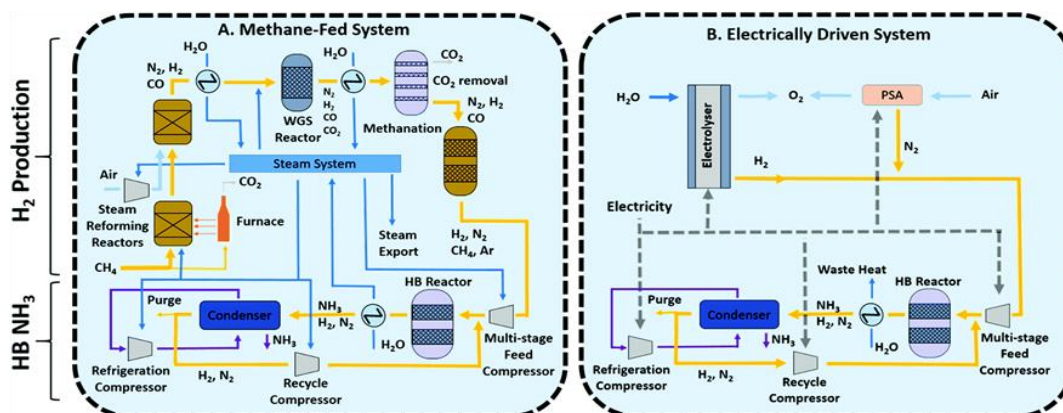


Fig 2. Esquema del proceso Haber-Bosch a) con SMR (Steam Methane Reforming); b) con electrólisis (Copyright 2020, Royal Society of Chemistry)

IV. UREA VERDE COMO ALTERNATIVA DE EXPORTACIÓN

Resulta interesante la posibilidad de utilizar el dióxido de carbono (CO_2), emitido durante el uso del compresor del proceso Haber Bosch, en un segundo proceso: la síntesis de urea. Los mencionados $0.3\text{-}0.6 \text{ tnCO}_2/\text{tnNH}_3$, se podrían obtener entre $0.35\text{-}0.75 \text{ tnUrea}/\text{tnNH}_3$, utilizando entre $0.6\text{-}0.8 \text{ tn}$ de amoníaco, quedando disponibles aún entre $0.4\text{-}0.2 \text{ tnNH}_3$ por cada tonelada de las originalmente producidas.

En este proceso de reutilización del CO_2 , y emitiendo los certificados correspondientes, 2 tn CO_2 representan alrededor de $160 \text{ euros}/\text{tnNH}_3$ producido (Fuente: Investing.com, November 17, 2025).

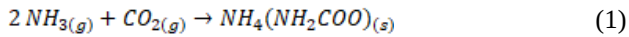
Será una decisión empresarial, considerando los factores mencionados: generación de CO_2 , mercado de bonos, precios del amoníaco y la urea, etc.; la producción de una u otra.

La urea, de fórmula química $\text{NH}_2\text{COONH}_2$, es un compuesto nitrogenado sólido, blanco y soluble en agua.

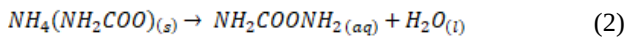
Aunque su uso principal es como fertilizante, recientemente se ha investigado su potencial como portador de hidrógeno. Al descomponerse térmicamente, la urea libera amoníaco, que puede ser convertido en hidrógeno mediante procesos catalíticos. Esta propiedad la convierte en un vector energético seguro, estable y no tóxico, ideal para almacenamiento y transporte de hidrógeno en aplicaciones energéticas sostenibles.

La síntesis industrial de urea se realiza a partir de amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). El proceso consta de dos etapas:

A. Formación de carbamato de amonio:



B. Deshidratación del carbamato de amonio:



Este proceso se lleva a cabo a alta presión ($130\text{--}200 \text{ bar}$) y temperatura ($170\text{--}200 \text{ °C}$). La eficiencia energética depende del tipo de tecnología empleada, siendo el proceso Stamicarbon con despojamiento (“stripping”) de CO_2 uno de los más eficientes (Figura 3, [9])

Este diseño es muy eficiente porque reutiliza el calor de la planta de urea hasta tres veces, lo que reduce el uso de vapor y agua de refrigeración. El equipo principal es el reactor de piscina (Pool Reactor), hecho con acero inoxidable Safurex® para mejorar el intercambio de calor. La tecnología *Ultra-Low Energy* (ULE) ayuda a bajar los costos operativos y a cuidar el medio ambiente al consumir menos energía y generar menos emisiones. Se puede usar tanto en plantas nuevas como en la actualización de instalaciones.

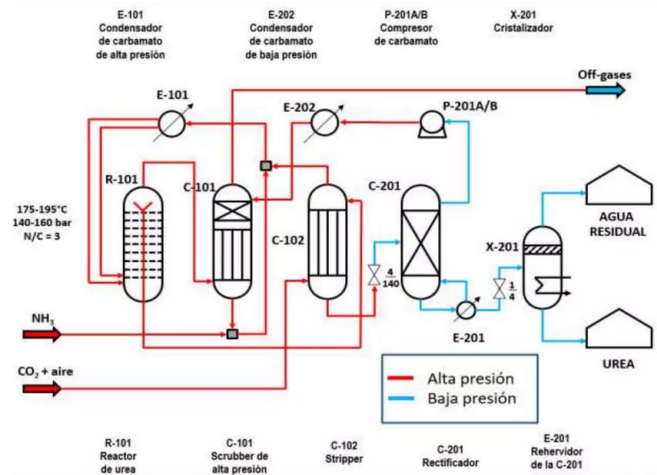


Fig 3. Esquema del proceso de síntesis de urea (Stamicarbon) [9]

Si consideramos la situación en Argentina, durante el año 2021 el precio del amoníaco tuvo un aumento significativo producto de las alzas en el precio del gas natural, el cual a su vez ha aumentado de manera importante su precio en los últimos meses del año debido a factores como el COVID-19, el aumento en la demanda energética, y más recientemente la guerra entre Ucrania y Rusia [5].

La condición de “verde”, permite la apertura de una ventana de oportunidad para la exportación del amoníaco/urea “verdes” hacia países con compromiso de reducción de gases de efecto invernadero.

Entonces, cabe destacar que la Argentina produce alrededor del 60% del amoníaco (y de la urea) que consume [4], por lo que es necesario importar el faltante. Sin embargo, la oportunidad está, en exportar amoníaco/urea “verde” (en torno a los u\$s 640 por tn) [10] e importar “gris” (en torno a los u\$s 400 por tn) [11].

V. ALMACENAJE Y DESPACHO

Considerando la ubicación de las presas hidroeléctricas y la disponibilidad portuaria, el análisis del escenario debe incluir el almacenaje, los estándares de seguridad, y la frecuencia del despacho.

La planta de amoníaco de Profertil en Bahía Blanca tiene una capacidad de producción anual de 790.000 toneladas, complementando su producción de urea, que es de 1.320.000 toneladas anuales. La capacidad de almacenamiento de amoníaco de la planta es de 20.000 toneladas, equivalente a 9 días de producción.

Por su parte, la capacidad de un buque para transportar amoníaco varía mucho, pero los buques cisterna modernos están diseñados para transportar alrededor de 48.320 toneladas (basado en una capacidad de más de 80.000 metros cúbicos).

Los buques más grandes que transportan amoníaco pueden tener una capacidad de hasta 109.248 toneladas. Así, la

capacidad de almacenaje en planta es capaz de completar menos del 50% de la capacidad de carga de un buque.

Sin embargo, el Green Power, un buque de nueva construcción con 180 metros de eslora y 28,7 metros de manga, capaz de transportar hasta 40.000 metros cúbicos de gas, realizó una prueba inicial para demostrar su capacidad de ofrecer un transporte eficiente y económico de amoníaco con bajo contenido de carbono. Este tipo de operación busca abastecer puertos que no requieran un buque completo. Además, la posibilidad de cargar conjuntamente amoníaco bajo en carbono y GLP (propano) se perfila como una estrategia para aumentar la disponibilidad de combustibles de bajas emisiones.

El transporte fue encargado por Trafigura, líder global en el comercio de materias primas, en colaboración con CF Industries, el mayor productor mundial de amoníaco. Este envío sigue a la primera transferencia de amoníaco de barco a barco realizada por Trafigura en julio de 2024 para CF Industries, demostrando que el proceso es seguro y eficiente. Con ello, se refuerza la viabilidad del suministro de amoníaco en el futuro, en línea con el crecimiento de la demanda de combustibles bajos en carbono basados en hidrógeno, que permitirán avanzar hacia la descarbonización de la industria naviera.

Entonces, el escenario incluye al potencial exportador de de la cuenca de Palermo Aike (Figura 4) respecto al Gas Licuado de Petróleo, abriendo la posibilidad de exportar conjuntamente ambos productos disminuyendo los costos de almacenaje y los riesgos de seguridad por acopio.

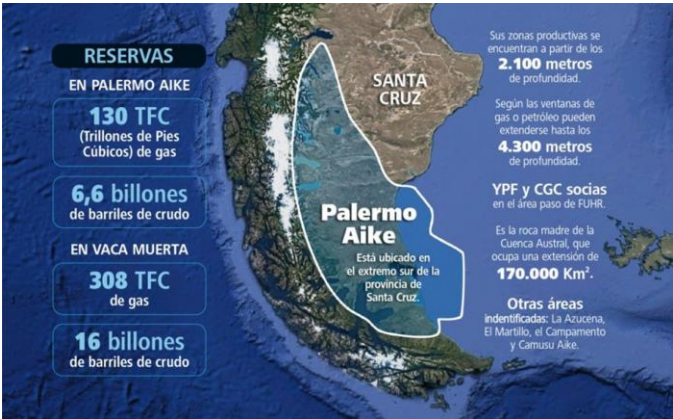


Fig 4. Ubicación de la cuenca Palermo Aike (Santa Cruz). (Fuente: <https://www.cadenario.com/131353-palermo-aike-la-segunda-vaca-muerta>)

VI. ARGENTINA Y LAS EMISIONES

Argentina está en condiciones de aprovechar estas características del escenario ya que su nivel de emisiones de dióxido de carbono por km² es, por ejemplo, 6 veces menor que países como España o Francia, y 24 veces menor que Alemania, lo que lo deja en una posición favorable para realizar esta operación (Tabla 1).

TABLA I. CANTIDAD DE CO₂ EMITIDA, POR KM², POR HABITANTE, DE DISTINTOS PAÍSES (2023)

País	Superficie (km ²)	2023		
		Mtn CO ₂	tn CO ₂ /habitante	tn CO ₂ /km ²
España	505.370	217,262	4,68	429,91
Francia	643.801	282,427	4,25	438,69
Alemania	357.580	582,951	7,06	1630,27
Japón	377.975	944,759	7,54	2499,53
USA	9.833.517	4682,039	13,83	476,13
UK	243.610	302,103	4,42	1240,11
Argentina	2.780.400	183,778	3,93	66,10

Elaboración propia. Fuente: DatosMacro.com (<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-CO2>)

Con estos datos se realizó el relevamiento bibliográfico del amoníaco, producción y usos, las normas y seguridad, las plantas de producción de amoníaco, con el objeto de contar con un modelo de comparación en escala, la disponibilidad de energía renovable, tanto en su cantidad, como en su ubicación, los canales posibles de exportación.

Considerando las dificultades del transporte eléctrico, y asumiendo que las presas de Santa Cruz se construyeran, este trabajo analiza la viabilidad de la obtención de amoníaco verde utilizando hidrógeno obtenido mediante electrólisis en la zona de Cte. Luis Piedrabuena y Puerto Santa Cruz.

La producción de amoníaco verde como forma de almacenamiento de hidrógeno sería la solución para varios problemas:

- Emisiones de CO₂
- Almacenamiento de energía de una manera más eficiente
- Independencia del precio internacional del gas metano
- Control de la intermitencia de la generación de hidrógeno con celdas fotovoltaicas.
- Las características fisicoquímicas hacen que la circulación del hidrógeno por cañerías pueda provocar el efecto de fragilización del material.

Considerando estas circunstancias, el escenario planteado mediante la generación de hidrógeno “verde” in-situ, y su exportación mediante mecanismos H₂/PtX, cumpliendo los requisitos de los mercados demandantes de certificación de energía producida con baja emisión de dióxido de carbono, se torna viable.

La prospectiva debe completarse con la reinversión de ingresos en la ampliación del sistema de transporte eléctrico para que, llegado el momento, sea posible la incorporación a la red de la energía renovable generada, considerando que, en algún momento, el recurso fósil perderá protagonismo.

VII. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El ciclo de vida evalúa todas las emisiones asociadas a producir hidrógeno, no solo lo que emite la planta proyectada.

Así, el ciclo de vida completo de la ruta de obtención de hidrógeno a partir de metano (SMR), como comentáramos, genera ~1,5 kg CO₂ por unidad de H₂. Su huella de carbono proviene de tres fuentes principales que reúnen el 94% de las emisiones, 57% por emisiones químicas directas del proceso (el CO₂ es un producto inevitable), 17% por la energía térmica requerida y 20% proveniente de la actividad upstream petrolera (extracción y fugas de metano). El resto de las etapas de transporte, infraestructura y servicios auxiliares.

En cambio, en la ruta con base en la electrólisis del agua, no se genera CO₂ directamente, dado que no hay carbono involucrado en la reacción. Las emisiones provienen principalmente de la electricidad utilizada. Si la misma proviene de fuentes renovables o hidroeléctricas, las emisiones resultantes son muy bajas. La reducción de emisiones, se explica por pasar de un sistema donde el carbono está químicamente incorporado (metano), a un sistema donde el impacto depende de la matriz energética

En nuestro caso particular, donde la fuente de energía es hidráulica, las emisiones se reducen fuertemente a 0,38. El 68% de las emisiones se originan en la producción de electricidad y el resto en su transporte, fabricación de equipos, insumo agua e infraestructura necesaria.

VIII. CONTEXTO NORMATIVO – REGLAS DE UNION EUROPEA:

Dado que las represas eléctricas en cuestión están en construcción, con avances parciales y una reactivación reciente, no serían “existentes” desde el punto de vista regulatorio europeo y podría así cumplirse con el requisito de “adicionalidad” que exige la Renewable Energy Directive (RED II / RED III) para considerar “verde” al producto obtenido. A su vez, deberá garantizarse la correlación temporal de la producción de hidrógeno con la generación eléctrica. Un punto importante y facilitador, sería vincular la posible terminación de las obras de las hidroeléctricas a la efectiva instalación de la planta de electrólisis, dada la falta de líneas de transmisión.

IX. VIABILIDAD ECONÓMICA:

Si bien el presente trabajo procura ahondar en la factibilidad técnica y de mercado, y no busca profundizar en términos de viabilidad económica. Destacamos que la electricidad explica la mayor parte del costo para la obtención de hidrógeno y por ende del amoníaco. El menor precio de la energía hidroeléctrica, junto a su alto factor de carga, juegan a favor del proyecto planteado.

Con una logística exportadora ya probada del amoníaco; aunque el transporte a Europa agrega en el orden de 0,05–0,15 USD/kg de NH₃ (5,8X expresado en Kg de H₂), ese costo

representa solo una fracción del total (entre 700 y 1000 USD/ton) y no anula la competitividad.

En este contexto, el proyecto en Argentina no necesariamente es el más competitivo en costos, pero sí por ofrecer un equilibrio sólido entre costo y estabilidad operativa, con altos factores de carga que mejoran la utilización de activos frente a países como Australia (energía muy barata pero más intermitente) y Europa (energía más cara pero mercado cercano), mientras que compite con el Medio Oriente —probablemente líder en costos por escala y financiamiento— como parte de un portafolio de abastecimiento diversificado que Europa necesita para cumplir sus objetivos de descarbonización; así, la viabilidad económica no depende solo del costo puro, sino de lograr producción confiable, certificable y a escala, condiciones bajo las cuales el proyecto presentado puede insertarse competitivamente en el mercado internacional.

A modo de referencia comentamos, que Argentina ofrece la posibilidad de integrar verticalmente proyectos de hidrógeno y amoníaco con generación hidroeléctrica competitiva, lo que permitiría acceder a energía en el orden de 30 a 40 USD/MWh. Para la obtención de 1Kg de hidrógeno se precisan 52 Kwh, así el componente electricidad del hidrógeno ascendería a 1,5 / 2,1 USD/kg.

En contraste, en Europa, si bien los contratos de energías renovables intermitentes pueden ubicarse en rangos similares, el costo de disponer de energía firme y estable para uso industrial —considerando almacenamiento, respaldo y perfilado— típicamente se eleva a 60–100 USD/MWh, pudiendo en ciertos casos duplicar el costo base de generación renovable. Esta ventaja se compensaría parcialmente con el mayor costo de transporte en forma de amoníaco.

Balance obtenido a lo largo de un funcionamiento de 24 horas.



Fig 5. Balance de masa y energía

X. IMPACTO AMBIENTAL:

El proyecto hidroeléctrico del río Santa Cruz implementa un Plan de Gestión Ambiental (PGA) robusto, con monitoreo continuo, actualización de información y participación institucional, lo que fortalece la factibilidad ambiental del proyecto y su capacidad de adaptación a lo largo del tiempo.

Los principales impactos —como la afectación a la migración de peces, aves en riesgo, el estuario y el patrimonio cultural— pueden ser mitigados en gran medida mediante diseño de infraestructura específica, gestión dinámica del recurso hídrico y medidas de compensación. El proyecto incorpora herramientas avanzadas de modelación que permiten

ajustar la operación para minimizar impactos en escenarios críticos.

El proyecto presenta impactos positivos relevantes: ingresos por regalías, impulso a la economía regional, generación de empleo, aporte significativo a la matriz energética nacional con fuente renovable y una reducción estimada de más del 90% en emisiones respecto a la media del sistema eléctrico argentino (Emisiones del proyecto: ~41,9 gCO₂/kWh). A su vez, el proyecto resulta una plataforma para ampliar el conocimiento científico de la cuenca y facilitar el desarrollo de energías renovables complementarias, como la eólica.

Impactos críticos, mitigados en la operación prevista:

- 1) Migración de peces,
- 2) Alteración del estuario (sedimentos, nutrientes, salinidad), por llenado del embalse.
- 3) Régimen hidrológico aguas abajo, se buscará replicar los caudales naturales.
- 4) Estuario del río Santa Cruz. Alta sensibilidad ecológica. Adecuación de diseño y gestión.
- 5) Se define un Caudal ecológico como condición obligatoria previa a intervenir el río.
- 6) Aves y biodiversidad: monitoreo, compensaciones y áreas protegidas.
- 7) Patrimonio cultural y natural: rescate, protección, inventario y creación de un centro de interpretación.

Respecto al impacto ocasionado por la instalación de las presas, deben contemplarse en el porcentual correspondiente a la energía demandada, el impacto en este caso no se considera porque la instalación de las presas no forma parte del proyecto en sí mismo, por el contrario, su uso reduce el impacto generado por su construcción.

Respecto a su construcción, ya existe estudio de impacto ambiental [14], cuyo resultado habilita su construcción.

El impacto por parte de los electrolizadores, por lo generado en su construcción e implementación, debe compararse contra la construcción e implementación del sistema de reformado de metano (SMR), el balance final estará dado por la escala del proyecto.

XI. CONCLUSIONES

En el escenario planteado, la propuesta consiste en transportar la energía producida en las presas Condor Cliff y la Barrancosa (Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), aproximadamente 170 km, hasta el área de influencia de la localidad de Cte. Luis Piedrabuena (Santa Cruz).

Esa energía se destinará a la producción de hidrógeno “verde”, y este a su vez a la producción de amoníaco, también verde, mediante el proceso de Haber-Bosch.

El amoníaco podrá ser embarcado para su exportación, en barcos duales, mediante los puertos de la mencionada Cte.

Luis Piedrabuena y Puerto Santa Cruz, localidad emplazada más cerca de la costa atlántica (Figura 1).

Teniendo en cuenta los estudios de ciclo de vida de Bicer, cambiar el método de producción de hidrógeno del metano a la hidro-electrólisis reduce las emisiones de dióxido de carbono de 1,5 a 0,38 tn CO₂/tn NH₃, [1], [7].

Por su densidad energética, capacidad de descomposición total y parcial a hidrógeno (H₂) e incluso uso como combustible, el amoníaco (generado a partir de H₂ renovable) se convierte en un carrier de H₂ muy prometedor para el futuro. El amoníaco de origen renovable a partir de hidrógeno procedente de electrólisis de agua, junto con la intermitencia en la generación eléctrica en parques de centrales renovables y el tamaño típico de estas centrales supone requerimientos añadidos que necesitan de alternativas al proceso tradicional de producción de amoníaco Haber-Bosch, con el fin de avanzar hacia la producción sostenible de amoníaco con emisiones libres de gases de efecto invernadero (GEI).

Analizando el proceso para la fabricación de amoníaco, debemos considerar tres cuestiones. La primera radica en la alta energía del enlace triple (946 KJ/mol), la segunda es la baja velocidad de la reacción a bajas temperaturas (dado que su energía de activación es elevada, del orden de 230-420 KJ/mol) y la tercera es encontrar la temperatura y presión óptimas para maximizar el rendimiento. Dado que se trata de una reacción exotérmica, la constante de equilibrio de la reacción aumenta al disminuir la temperatura, siendo la óptima de -53°C.

El amoníaco normalmente se puede almacenar en estado líquido o gaseoso, para esto se puede optar entre las siguientes opciones [12]:

- Almacenamiento refrigerado a presión atmosférica en estado líquido (-33°C y 1 bar);
- Almacenamiento presurizado a temperatura ambiente en estado líquido (30 bar y temperatura máxima de 50°C);
- Almacenamiento refrigerado a baja presión en estado líquido (< 10 bar);
- Almacenamiento a baja presión y temperatura ambiente en estado gaseoso (< 10 bar). Es importante tener en cuenta que el almacenamiento de amoníaco en estado gaseoso va a necesitar tanques de mayor volumen para almacenar la misma cantidad que en los casos de almacenamiento en estado líquido. Esto se debe a que la densidad depende directamente de la presión y temperatura a la cual se encuentre el fluido (tablas de vapor de NH₃, Figura 6 [12]).

Se puede concluir que el almacenamiento del NH₃ líquido implica gastos en refrigeración y el almacenamiento del NH₃ en estado gaseoso requiere recipientes más grandes y costosos ya que el gas estará sometido a altas presiones. Por lo tanto, una de las maneras de ahorrar en almacenamiento sería utilizar el

amoníaco producido para la fabricación de urea u otro fertilizante.

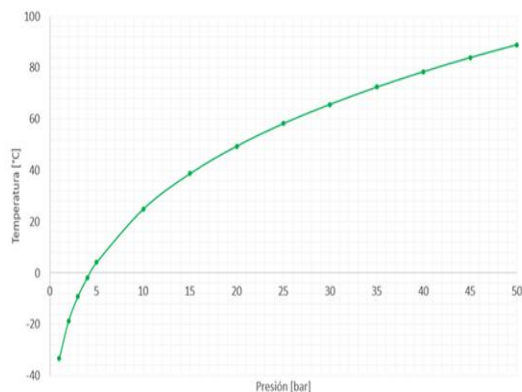


Fig 6. Curva de presión de vapor del amoníaco

Entonces, el tercer eslabón de la cadena propuesta es la Urea verde. La investigación propone la integración de la planta de producción de amoníaco verde con una que produzca urea y la mejora de los catalizadores con el objetivo de disminuir la temperatura en el reactor.

Dado que la logística del transporte de gases es más complicada, por la necesidad de altas presiones y bajas temperaturas, que la de líquidos, y que ésta a su vez lo es frente a los sólidos (la densidad energética aumenta con la densidad másica, y el volumen a transportar disminuye), en general resulta más conveniente el transporte de estos últimos.

Esta acotación obedece al hecho que la urea en solución es utilizada, también, para tratar gases de escape que deban cumplir con Normas Euro 4 en adelante, pero es más rentable transportar el sólido, y obtener esta solución en destino, que exportarla como tal. A nivel local, es otro escenario, en este caso es más conveniente obtener la solución de urea como un producto intermedio del proceso, antes de la deshidratación, abaratando los costos de producción.

REFERENCIAS

- [1] Morante, J.R.; Andreu, T. (2020). Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada. Fundación Naturgy, 2da. Edición. Madrid, 87-90.
- [2] TriWijayantaAziz, A., y Nandiyanto, A. B. D. (2020). "Ammonia as effective hydrogen storage: A review on production, storage and utilization", *Energies* (Basel), vol. 13, n.o 12, jun. 2020, doi: 10.3390
- [3] Champetier, C. (2023). "Escenarios H2V y PtX. El Rol del Hidrógeno para Argentina: Estudio de escenarios de hidrógeno y PtX. H2LAC". Buenos Aires.
- [4] Barrera, F.; Hauser, P.; Carlino, H.; Carlino, M.; Caratori, L. (2023). "Argentina como centro de producción de amoníaco verde". Agora. Berlín.
- [5] Kenkel, P. (2017): "Causes of Fertilizer Price Volatility". Bill Fitzwater Cooperative Chair. Oklahoma State University,
- [6] Harun, U.; Yakup, A.; Esin, Y. (2022). "The volatility connectedness among fertilisers and agricultural crop prices: Evidence from selected

main agricultural products". *Agricultural Economics – Czech*, 68: 348–360.

- [7] Brizuela Dorado, J. (2022). "Estudio de procesos para la producción de amoníaco a partir de H2 obtenido mediante electrólisis desde recursos renovables". Universidad de Valladolid. Escuela de ingenierías
- [8] Ayala, Diego. (2024). "Buenas prácticas en el desarrollo temprano de una planta de amoníaco de bajas emisiones". HINICIO S.A.
- [9] Stamicarbon B.V. (2016). "Launch Met". The Netherlands
- [10] Solar Energy Corporation of India Limited. (2025). "A Historic Milestone for India's National Green Hydrogen Mission". h2news. Chile. <https://h2news.cl/2025/08/04/>
- [11] ChemAnalyst. (2025). "Ammonia Price trend and forecast". <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/ammonia-2052>
- [12] Nayak-Luke, R. M., Z. Cesaro, y Bañares-Alcántara R. (2021). "Pathways for Green Ammonia", en *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*". Elsevier, pp. 27-39.
- [13] Alterini, Federico J. | Eterovic, Jorge E. | Blanco, Gabriel E. | Fauroux, Luis E. | Salcovsky, Natalia M. (2024). "Viabilidad de la obtención de amoníaco a partir de hidrógeno verde", *Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería 2024*. Facultad de Ingeniería, UNSJ - CONFEDI.
- [14] EBISA. (2017). Aprovechamientos hidroeléctricos del río Santa Cruz – Estudio de Impacto Ambiental.
IF-2017-11741182-APN-DDYME#MEM