

Energy Decarbonization via Green H₂ or NH₃?

Simson Wu, Nicholas Salmon, Molly Meng-Jung Li, René Bañares-Alcántara,
and Shik Chi Edman Tsang

ACS Energy Lett. 2022, 7, 1021–1033

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.1c02816?ref=pdf>



RESUMEN Y COMENTARIOS

https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7111350463890890752?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

Por: Freddy Quijaite Dávila
24.09.2023

ÍNDICE

- 1 Visión general y estructura del artículo
 - 2 Vectores energéticos: Amoníaco, Hidrógeno y Metanol
 - 3 Introducción al Hidrogeno y Amoníaco verdes
 - 4 Producción de H₂, NH₃ por medios térmicos/fotoquímicos / electroquímicos
 - 5 Almacenamiento y transporte
 - 6 Debate /Conclusión: Hidrógeno vs Amoníaco verdes
-

1. VISIÓN GENERAL Y ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO (*)

El artículo toma como base la **necesidad global de “descarbonizar” la energía**, camino que claramente pasa por sustituir los combustibles fósiles a través de una utilización masiva de energías renovables. Sin embargo, **en la práctica el almacenamiento, transporte y utilización a gran escala para las energías renovables, aún no están completamente desarrollados**. Este artículo enfoca una **revisión de los vectores energéticos verdes Hidrogeno (H₂) y Amoníaco (NH₃)**, evaluando **limitaciones** termodinámicas, barreras cinéticas (que requieren altas presiones/temperaturas, más gasto energético), **materiales, tecnología actual y la ubicación geográfica**.



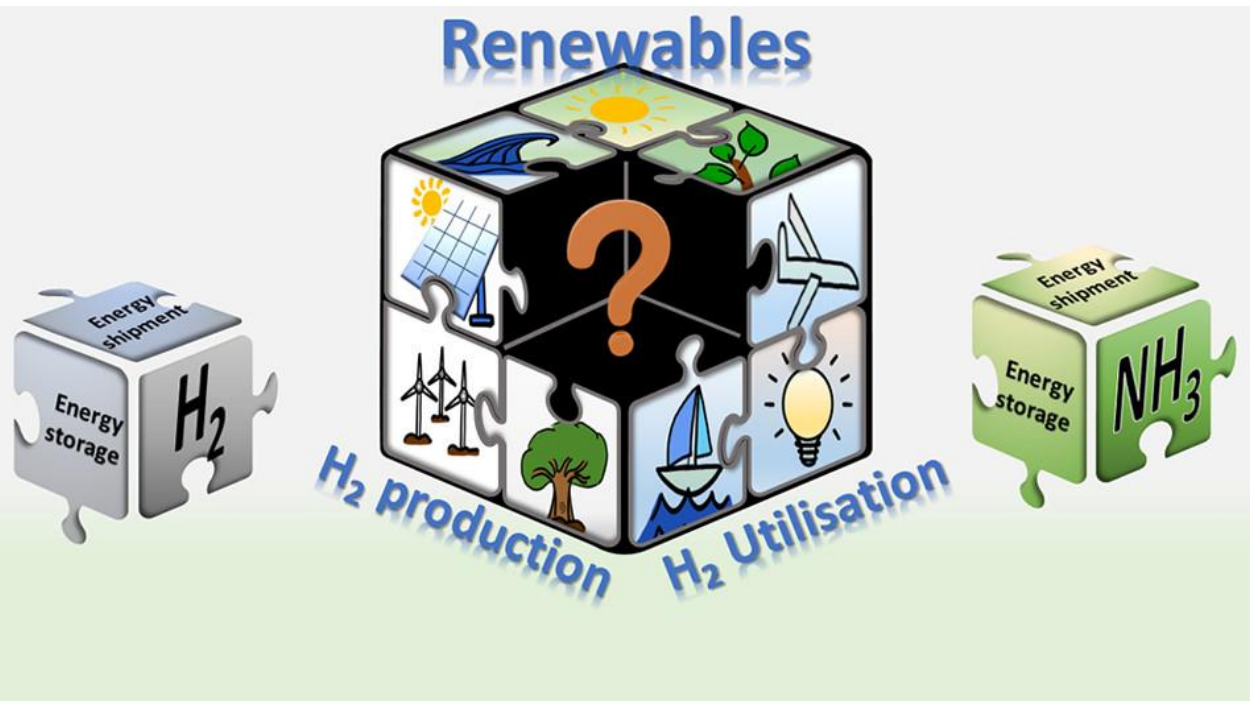
- **VECTORES ENERGÉTICOS:
AMONÍACO, HIDRÓGENO Y METANOL**
- **INTRODUCCIÓN AL HIDRÓGENO Y
AMONÍACO VERDES**
- **PRODUCCIÓN DE H₂, NH₃ POR MEDIOS
TÉRMICOS/FOTOQUÍMICOS / ELECTROQUÍMICOS**
- **ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE**
- **DEBATE /CONCLUSIÓN: HIDRÓGENO VS
AMONÍACO VERDES**
- **COMENTARIOS Y PUNTOS DE VISTA**

Fuente de la Imagen [2].

() El artículo, tiene un “abstract”, 5 secciones, 108 referencias y 4 lecturas que recomienda revisar.*

2. VECTORES ENERGETICOS: AMONÍACO, HIDROGENO Y METANOL (**)

Debido a las **devastadoras consecuencias por la contaminación del medio ambiente**, por la **emisión de gases de efecto invernadero** se busca disminuir el uso de combustibles fósiles, mediante el **impulso de desarrollo de energías renovables**. En la última década solo China ha incrementado su **superficie FV 60 veces y en 30 veces sus turbinas eólicas**. La variabilidad de las renovables ha requerido un desarrollo de **sistemas de almacenamiento liderados por hidro bombeo y baterías**. También se tiene un alto potencial en **almacenamiento químico de energía** debido a su densidad de energía y puede aprovechar la red de transporte existente, además con ventajas sobre las baterías. Por lo que hay un creciente interés en el mercado por el **desarrollo del H₂ y NH₃ verdes**, como **vectores energéticos**, como solución a la búsqueda de energías limpias.



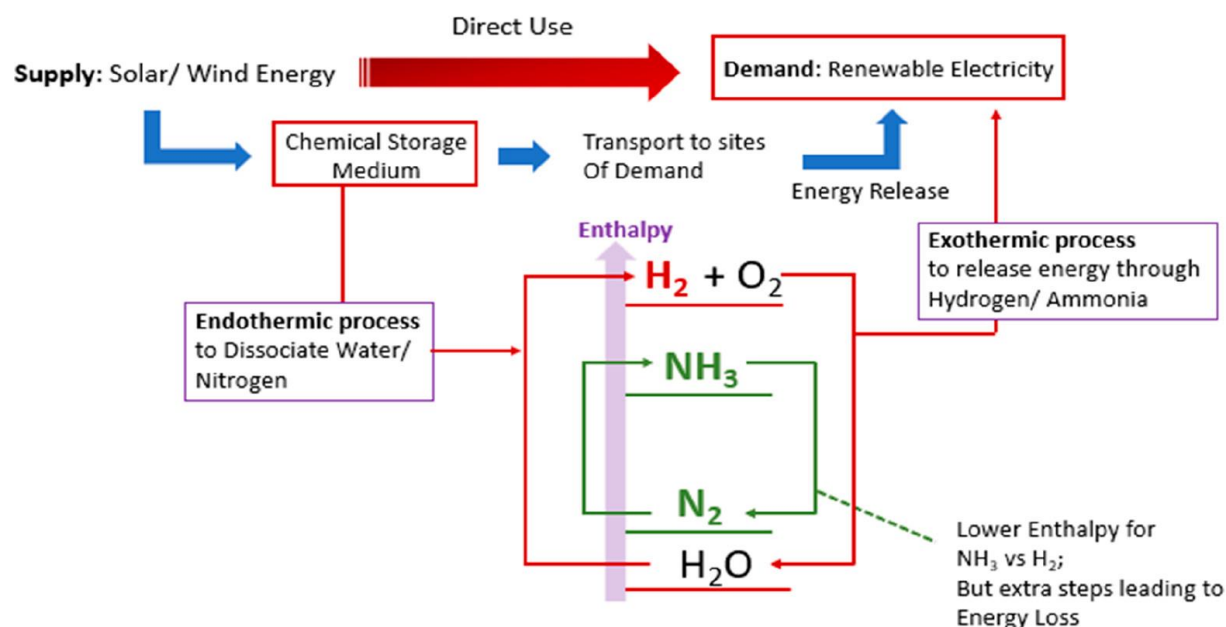
- Un vector energético es un transportador de energía, desde una fuente de energía (con capacidad de almacenar).
- No es lo mismo una fuente de energía que un vector energético.
- Un gaseoducto de GN transporta energía.
- El H₂, no es una fuente de energía
- Un gaseoducto de H₂ no equivale a un gaseoducto de GN, equivale más a una red AT (transmite de energía).

Hidro bombeo (PHES): Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo “*pumped hydroelectric energy storage*”

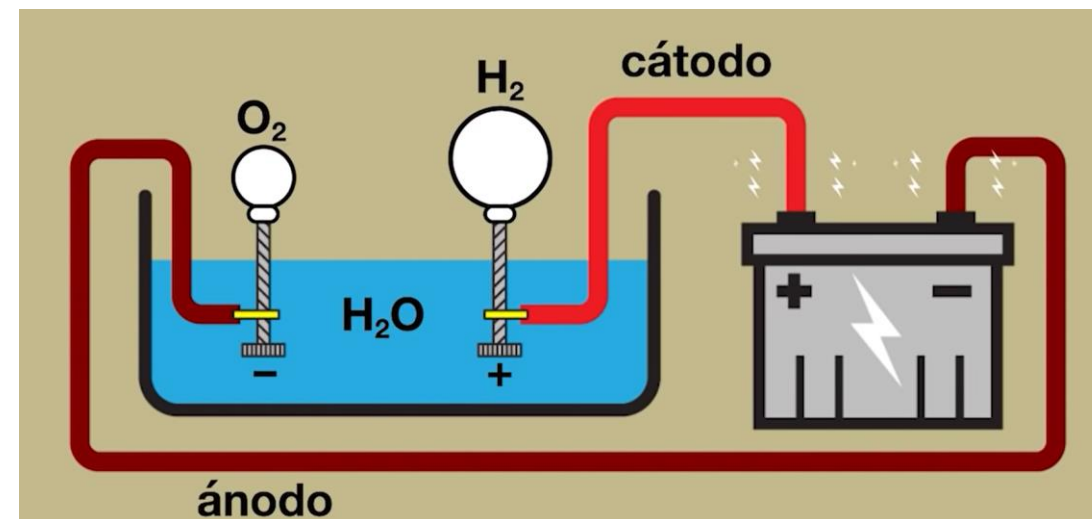
(**) El artículo no se centra en el metanol como vector energético, debido que requiere CO₂ puro de emisiones industriales o del aire a un costo muy alto.

3. INTRODUCCIÓN AL HIDROGENO Y AMONÍACO VERDES (1 de 3)

El H₂ verde es la piedra angular de los vectores energéticos, obteniéndose mediante **electrólisis** con exceso de electricidad renovable, **disocia el agua en H₂ y O₂**, almacenando el H₂ como energía química, seguida de la posterior liberación de energía a través de pilas de combustible o combustión. Termodinámicamente, el **agua pasa por proceso endotérmico para liberar el H₂ y por un proceso exotérmico para recombinarse con el O₂ del aire formando H₂O, completando el ciclo energético libre de emisiones CO₂**. Cuando se utiliza **NH₃ como portador químico para obtener H₂**, se requieren pasos adicionales en el ciclo anterior, en el cual se consume energía. **El hidrógeno, tiene potencial para descarbonizar** (cero emisiones), **procesos industriales, transporte, como energía de almacenamiento en industrias marítimas, aviación, transporte liviano /pesado y acerías**.



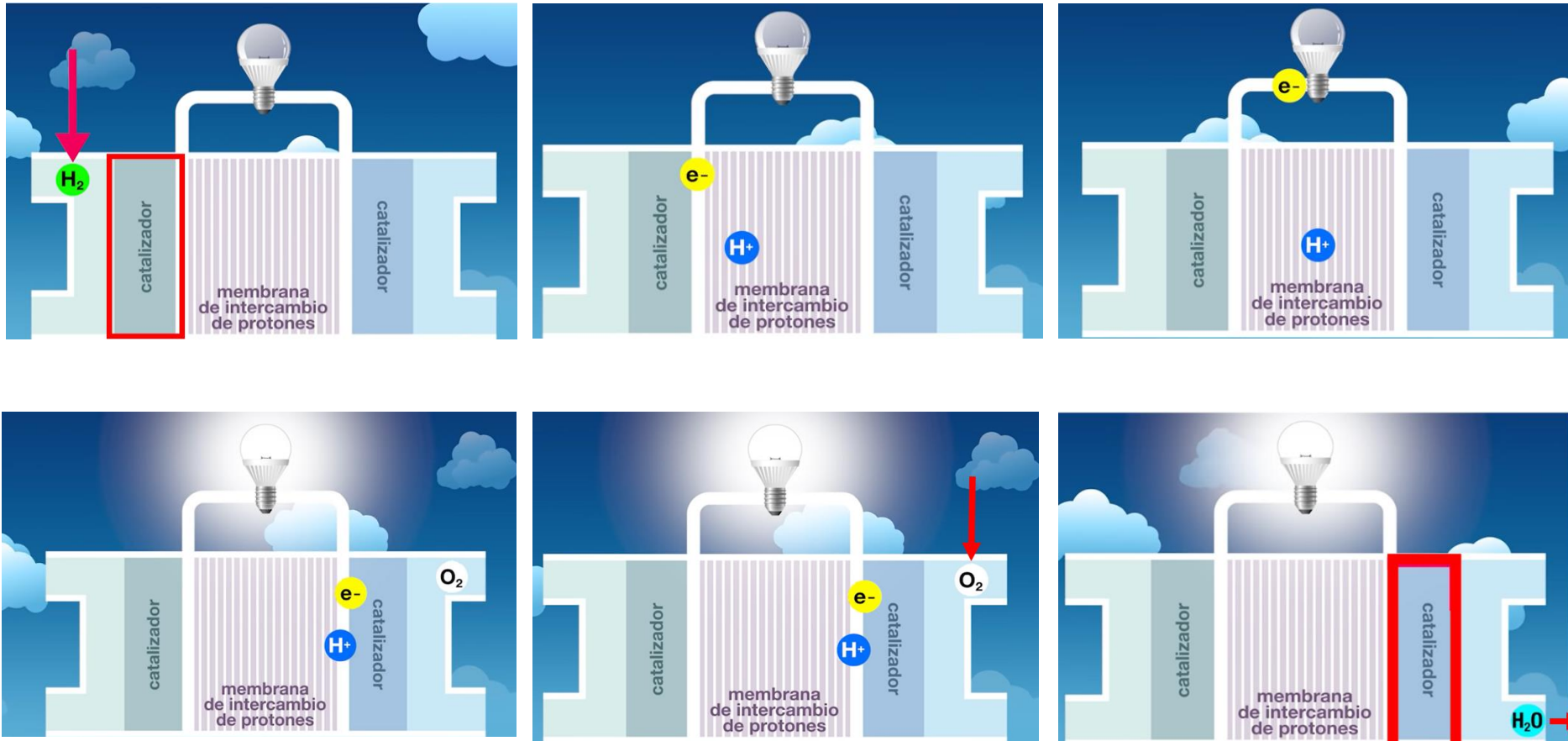
Consideraciones termodinámicas, vectores energéticos H₂ y NH₃ [1]



Fuente de la imagen [3].

- Obtener H₂ verde, se requiere un proceso de electrólisis con H₂O (celda electrolítica), alimentado con **exceso de electricidad renovable**, obteniéndose como subproducto O₂.

3. INTRODUCCIÓN AL HIDROGENO Y AMONÍACO VERDES (2 de 3)



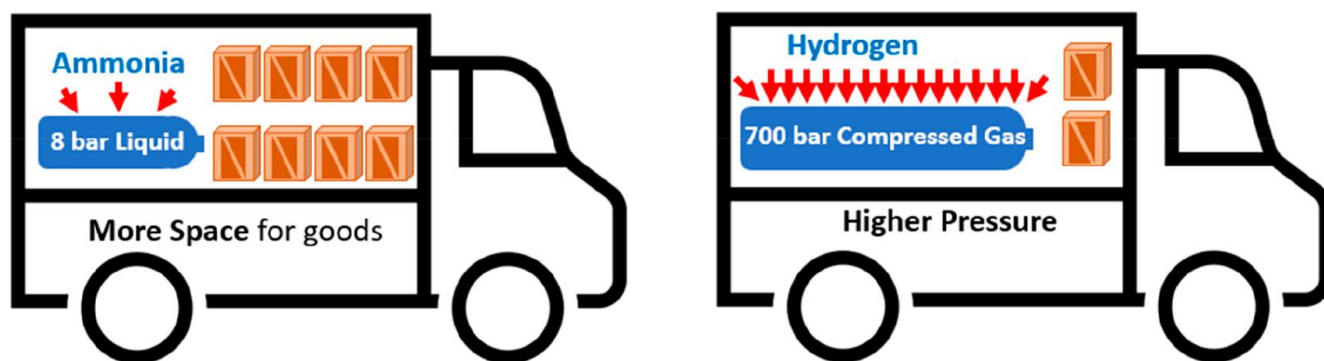
Fuente de las imágenes [3].

- En lugar de aplicar electricidad, se obtiene electricidad mediante una **celda electroquímica** (pila de combustible), H_2 , O_2 , membrana de intercambio de protones y catalizadores)
- El H_2 , ingresa al catalizador, dividiéndose en electrones e^- y iones H^+ , los e^- se colectan produciendo electricidad, los iones H^+ pasa a través de la membrana hacia el otro catalizador donde se encuentran con O_2 (obtenido del aire) y parte de los e^- , reaccionando para formar H_2O como sub producto.

3. INTRODUCCIÓN AL HIDROGENO Y AMONÍACO VERDES (3 de 3)

La **alta volatilidad e inflamabilidad** del **H₂**, su **baja densidad energética volumétrica** **8 MJ/L** (líquido a **-253 °C**) y **4,5 MJ/L** (a **70 Mpa**); dificultan el manipuleo, transporte de la producción hacia el almacenamiento y puntos de consumo, la **licuefacción del H₂** requiere un **tercio de su poder calorífico**. Mientras que el **NH₃** tiene **12.7 MJ/L** y puede **almacenarse** en forma **líquida ligeramente presurizado**, bajo esta perspectiva el **NH₃** es un **prometedor portador de H₂** a pesar de la energía necesaria para sintetizar NH₃ a partir de N₂ e H₂. **Transportar energía química a través del NH₃** es viable, cuenta con **infraestructura de transporte operando para NH₃ gris** a diferencia de los mayores **volúmenes y exigencias mecánicas/estructurales** que se requieren **para el H₂**. Una vez el **NH₃** este en su **destino se puede obtener H₂**, o emplearlo como pilas de **combustible en la industria naviera**, así como una importante contribución en los **fertilizantes para una agricultura sostenible**.

For the **SAME** volume of Energy

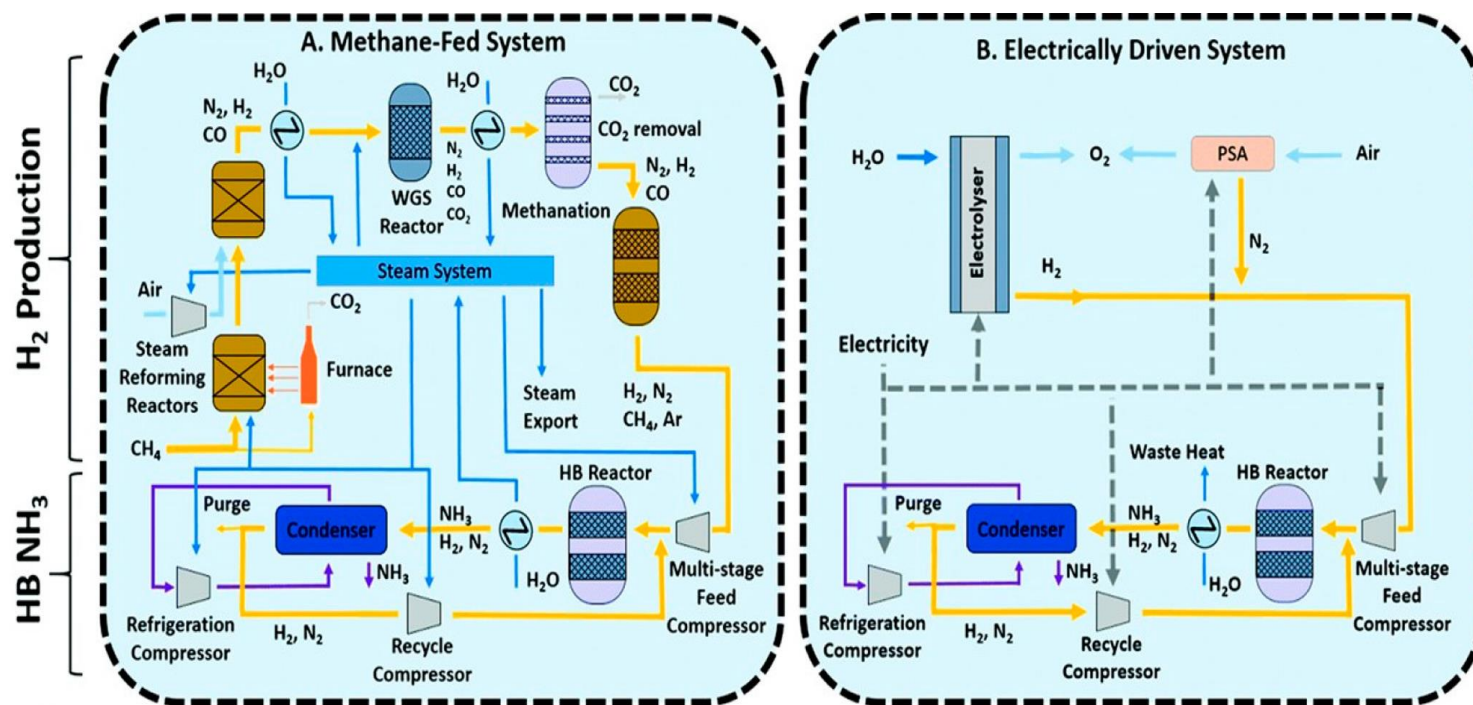


Comparación de volúmenes con igual valor energético, en camiones propulsados con NH₃ y H₂ [1]

- A más densidad energética por litro, menos volumen de almacenamiento y transporte.
- Comprimir el H₂ a 35 Mpa, implica un mayor volumen para el mismo valor energético.
- El mayor gasto energético para manipular, almacenaje y transporte del H₂, se da por sistemas de compresión y/o criogenización, que reduce un 30% su eficiencia energética.
- No hay desarrollo práctico para gaseoductos de H₂ líquido.
- El 3% del CO₂ anual, es emitido por el sector naviero, si este sector fuera un país sería el sexto país más contaminante del mundo.

4. PRODUCCIÓN DE H₂, NH₃ POR MEDIOS TÉRMICOS/FOTOQUÍMICOS / ELECTROQUÍMICOS (1/3)

El H₂ abundante en el planeta, en combinación con otros elementos como H₂O e hidrocarburos, excepto en la atmósfera donde solo es el 0,00005%. Según la liberación de CO₂ en el proceso tanto el H₂ como el NH₃ se califica como gris/marrón, azul o verde. Este último con energía de entrada renovable, produciendo H₂ mediante electrolisis, según el electrolizador (electroquímico/fotoquímicos). La producción de NH₃ marrón/gris es mediante el proceso Haber-Boch (HB), que libera gran cantidad de CO₂. Cuando NH₃ es verde el H₂ que alimenta H-B es obtenido por electrólisis. La alta disponibilidad del GN y el elevado costo de las fuentes de energías renovables es uno de los mayores obstáculos para el H₂ y el HN₃ verdes que tienen procesos similares.



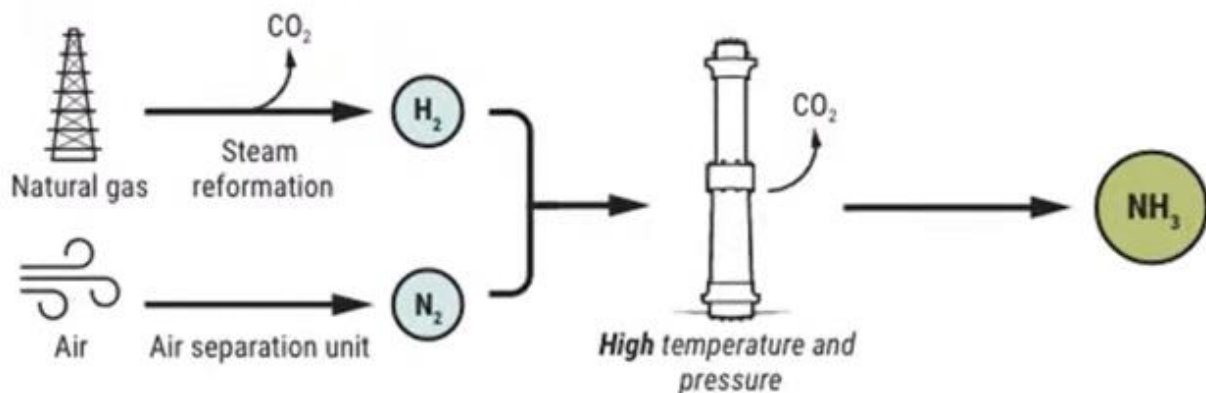
- H₂ está presente en más del 75% de la materia, es muy ligero, escapa del planeta, nunca esta solo forma parte de otras moléculas, por lo que extraerlo demanda un gasto energético.
- Los procesos de obtención H₂ y NH₃ verdes requieren que la energía sea constante y económica, las renovables son variables por lo que, para estabilizarlas, requieren sistemas de almacenamiento elevando sus costos.

Esquema de producción NH₃ con H-B, (A) obteniendo H₂ del CH₄, N₂ del aire y (B) obteniendo H₂ de electrólisis /N₂ del aire [1]

WGS reactor para purificar el H₂

4. PRODUCCIÓN DE H₂, NH₃ POR MEDIOS TÉRMICOS/FOTOQUÍMICOS / ELECTROQUÍMICOS (2/3)

La ubicación de **la producción de ambos vectores verdes suele ser adyacentes**. Las plantas de H₂ verde, están relativamente más posicionadas en términos de infraestructura e inversión que la plantas de NH₃ verde, **debido a altos costos de inversión comparado con plantas de NH₃ gris**, a pesar de que, en términos generales, la producción de NH₃ verde es más sencilla ya que elimina procesos químicos/térmicos complicados de purificación del GN .

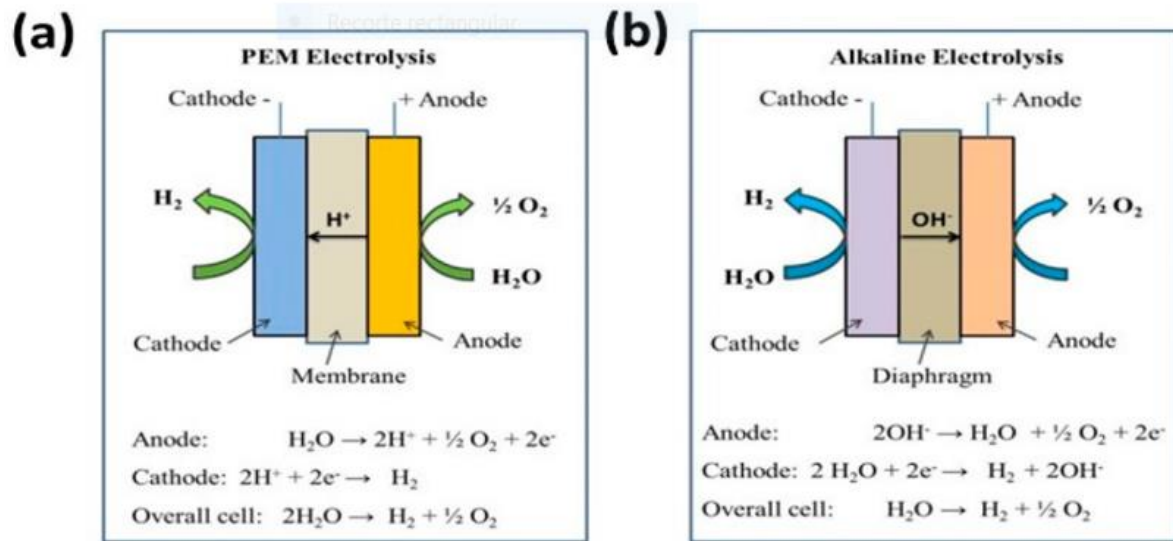


Source: Service, R. Science, July 12 (2018)

- Haber sintetizó NH₃ en 1918, Bosch en 1931, escaló el proceso con un reactor a alta presión y temperatura.
- Extraer H₂ del CH₄ tiene como subproducto CO₂, 1 TN NH₃ implica 2 TN de CO₂.
- NH₃:
Gris (250-350 USD/TN)
Azul (350-400 USD/TN)
Verde (>750 USD/TN).
- El 95 % del NH₃ se produce desde el GN.
- Marrón: carbón
Gris: petróleo, GN (libera CO₂)
Azul: GN (atrapa CO₂)
Verde: electrólisis, ER, no CO₂
- El proceso azul captura CO₂, lo inyecta al sub suelo confiándolo teóricamente por 10,000 años. Usualmente el gasto energético (compresión transporte) de este proceso no es considerado en el balance de energía.
- Contradictoriamente, parte del CO₂, capturado es usado para recuperar petróleo, inyectándolo en el depósito para elevar la presión de explotación.

4. PRODUCCIÓN DE H₂, NH₃ POR MEDIOS TÉRMICOS/FOTOQUÍMICOS / ELECTROQUÍMICOS (3/3)

El **H₂ verde** se produce **directamente por electrólisis**, también mediante procesos electroquímicos, fotoquímicos (aún en desarrollo) ambos con mayor demanda energética (por barreras cinéticas), siendo más prometedor el electroquímico. Actualmente los electrolizadores disponibles en el mercado son los de **membrana de intercambio de protones (PEM)**, los **Alcalinos** y superando aún desafíos para aplicación industrial los **de óxido de sodio (SOEC)** que **trabajan a altas temperaturas**. Se estima que para el **2030 la electrólisis PEM por sí sola no será suficiente para la producción estimada de H₂**, debido a la escasez de los materiales de los catalizadores de iridio y platino con **cuya actual producción solo se puede respaldar de 3 GW a 7.5 GW por año vs 100 GW requeridos al 2050**. El **costo de H₂ verde es de 2 a 3 veces más que el H₂ azul**, DOE (USA) estima al **2025 unos 2 USD/kg y 1 USD/kg al 2050**, para así lograr superar la competitividad del H₂ marrón/gris y azul.



Esquema de electrólisis del H₂O, con electrolizador PEM (a) y Alcalino (b) [1]

- Los electrolizadores PEM, se adaptan a la variabilidad de las fuentes de energía, su inversión es más alta del mercado, es usual para sistemas “off grid”
- Almacenamiento energético con H₂ (pilas de combustible), son más viables para transporte naviera y aeronáutica por el peso de la opción BESS.
- Los electrolizadores Alcalinos, usa un proceso más rígido y la fuente de energía debe ser estable, tiene una inversión más baja, es usual para sistemas “on grid”
- Pila de combustible (celda electroquímica) convierte la energía química contenida en combustible sin combustión.
- El electrolizador representa el 80% del costo de inversión (capex/opex) de una planta. (Dr. René Bañadares Alcántara).
- 1% de la producción mundial de H₂ es verde, solo 0.1% del H₂ consumido es verde.
- 60 kWh, para 1 kg H₂ verde.
- H₂ gris: (1 USD/kg)
H₂ verde: (8USD/kg)
- IRENA: 1.15/5 USD/kg -2030 y 0.65/1 USD/kg - 2050.

5. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

La diferencia de densidad energética por volumen del H₂, hace que para el almacenamiento y transporte del se den mayores requerimientos de volumen (compresión y licuefacción) con un mayor gasto energético y de costos. El H₂ líquido sólo puede transportar 8 MJ/L en comparación con los 12.7 MJ/L del NH₃ y los 32 MJ/L de la gasolina, por lo que, el almacenamiento y transporte de H₂ es aún un desafío para su suministro y distribución. El transporte de H₂ se realiza como gas comprimido a 700 bar (38 kg/m³) o líquido criogénico a -252,8 °C (71 kg/m³), la licuefacción del H₂ consume un tercio de la energía de la que puede transportar. Por lo que se plantea la viabilidad de aprovechar el desarrollo en almacenamiento y transporte del NH₃ como portador químico del H₂.

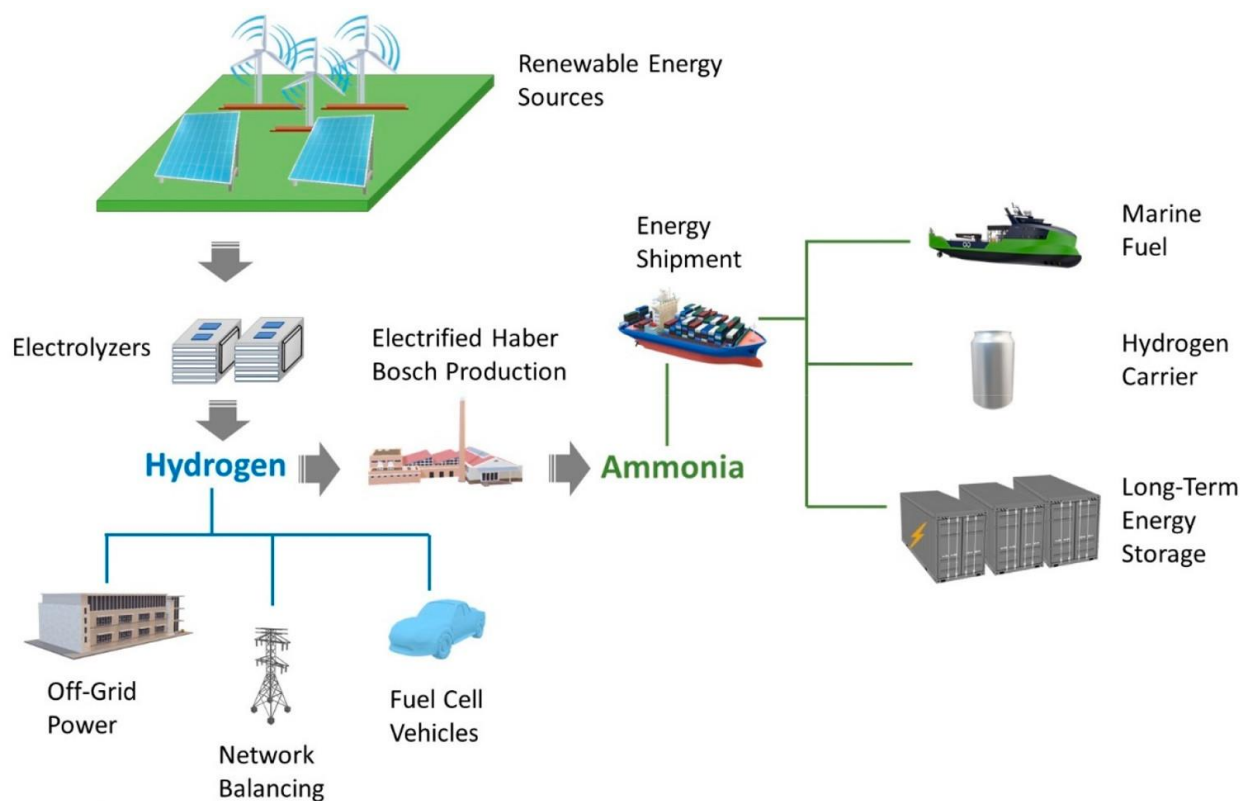


Fuente de la Imagen [2].

- Si se produce H₂ en Australia y se consume en Japón, se requiere transporte, actualmente es más viable transportarlo como NH₃ y poco probable a través de un gaseo ducto (aún en desarrollo)
- El H₂ tiene altos costos para almacenar y más para transportar, que no serán competidos a largo plazo cuando más bajen los electrolizadores.
- Un gaseoducto H₂, debe tener garantizado cantidades significativas de producción y consumo, no hay desarrollo actual para esta magnitud de transporte.
- Las tuberías para H₂ líquido, aún están en desarrollo, requieren elevada estanqueidad y evaluar efectos con el material de las tuberías de acero. Aun no existen buques de transporte de H₂.

6. DEBATE /CONCLUSIÓN: HIDRÓGENO VS AMONÍACO VERDES (1/2)

Resulta muy **sensato** desde un punto de vista energético y termodinámico **tomar H₂ libre de emisiones** a través de energía renovable **de la abundante H₂O**, **utilizar NH₃ como portador de H₂**, **aprovechar la sinergia de la infraestructura de transporte ya instalada para NH₃**. Se establece que **no hay una supremacía de un vector sobre el otro**, concluyendo que **serán complementarios con un desarrollo simultáneo a gran escala apuntando a una economía libre de carbono**. La producción de H₂ verde está industrializada, **se espera que los costos de los electrolizadores y la energía renovable disminuya en el mediano y largo plazo**. La producción de **NH₃ verde**, es una **tecnología relativamente nueva** y apenas se han comenzado a considerar, pero como portador de H₂ es muy prometedor a mediano y largo plazo. Se **plantea producir NH₃ off shore** considerando energía renovable **eólica en ciertas zonas donde han demostrado ser confiables**.



Economía futura de combustibles verdes: ¿H₂ o H₃? [1]

- IRENA (International Renewable Energy Agency), anuncia que en 2050 se necesitarán unos 5000 GW de capacidad de electrolizadores, frente a los 0,3 GW actuales. Esta escala de crecimiento acentúa la importancia del hidrógeno bajo en carbono desde el principio. En 2050, dos tercios del hidrógeno total serán verdes -producidos con electricidad renovable- y un tercio azul, producidos por gas natural unido a la captura y almacenamiento de carbono (CAC).
- Estos vectores energéticos desempeñarán un papel primordial en la transición a cero emisiones por lo que es necesario impulsar su regulación.
- 1 TN NH₃ usa 1.6 TN H₂O, es viable desalinización, consumiendo el 0.1% de la energía para producir NH₃.

6. DEBATE /CONCLUSIÓN: HIDRÓGENO VS AMONÍACO VERDES (2/2)

A pesar, que **el H₂ tiene la mayor densidad energética gravimétrica de todos los combustibles conocidos**, puede producirse sin emisiones con una tecnología ya desarrollada, **pero su baja densidad energética por volumen e inflamabilidad dificultan el desarrollo masivo**. Por el contrario, **el NH₃ puede superar las dificultades técnicas del H₂ con una mayor densidad energética por volumen, estrecho rango de inflamabilidad** que pueden permitir una “economía de NH₃”, por otro lado, **es tóxico en la actualidad (*)**, requiere aún un elevado gasto energético para producirlo y descomponerlo. Por lo que la **adopción del H₂ y el NH₃ en conjunto puede conducir hacia una economía libre de carbono**, combinar lo mejor de ambos vectores para ofrecer una energía renovable descentralizada a la red.



Fuente de la Imagen [2].

- Es más viable usar H_{2G} si se va a consumir en el corto plazo y cuando el punto de consumo es cercano a la producción.
- Es más viable usar NH_{3G} si se va a consumir en el mediano/largo plazo y cuando el punto de consumo es ciento/miles de km desde la producción.
- El H_{2G} , HNH_{3G} ofrecen una solución para tipos de demanda de energía que son complicadas de electrificar directamente.
- La demanda de H_{2G} está limitada por costo y disponibilidad, la aplicación más desarrollada es en sector vehicular, un salto importante se dará cuando se reduzcan los costos de las renovables y de los electrolizadores.

(*) El NH₃ es toxico aun en bajas concentraciones, genera NOx, en función a condiciones de combustión.

Información de Contacto



Freddy Quijaite Dávila

Ing. Electricista, CIP 64760

fquijaite@gmail.com

Referencia:

[1] Energy Decarbonization via Green H₂ or NH₃?, (ACS Energy Lett. 2022, 7, 1021–1033) - Simson Wu, Nicholas Salmon, Molly Meng-Jung Li, René Bañares-Alcántara and Shik Chi Edman Tsang.

Imágenes:

[2] “White Paper”: Green Hydrogen in China: A Roadmap for Progress, publicado por World Economic Forum en junio 2023

[3] Divulgación técnica, Dra. Cinthia Astrid Reyes Lozano, Universidad de Guadalajara Mx .