



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Técnicas y herramientas modernas II

H2 Verde:

Despegue, Desafíos y Oportunidades en la Infraestructura Energética Mundial

Ander Egg, Marcos 12477
Artero, Francisco 12474
Gambino, Ignacio 12153
Roncoroni, Justo 12656



ÍNDICE

1. Resumen	1
2. Introducción	1
3. Aspectos técnicos	2
3.1. Producción de H ₂	2
3.1.1. Estadísticas de producción de H ₂	5
3.2. Almacenamiento, transporte y distribución	6
3.3. Aplicación del h ₂ en el transporte	9
3.3.1. Tecnología de celdas de hidrógeno	10
3.3.2. Combustión interna	11
3.3.3. Autonomía y almacenamiento	12
3.3.4. Infraestructura actual del H ₂ para el transporte	13
3.4. Desafíos técnicos	14
4. Aspecto económico	14
4.1. Oportunidades Económicas:	14
4.2. Desafíos Económicos:	15
4.3. Perspectivas Futuras:	16
5. Desafíos Sociales:	16
6. Desafíos Políticos:	16
7. Caso particular H₂ verde en Argentina	18
7.1. Proyecto Hidrógeno Verde Fortescue	18
7.2. Foro Global de Hidrógeno Verde 2023	19
8. Conclusiones	20
9. Bibliografía	21

1. Resumen

La transición hacia fuentes de energía sostenibles ha posicionado al hidrógeno verde como una prometedora estructura crítica en el panorama energético global. Este paper se sumerge en la visión desde el ámbito de la ingeniería industrial, explorando los desafíos inherentes que han obstaculizado su progresión como nueva fuente de energía. A pesar de su potencial para revolucionar la matriz energética, el camino del hidrógeno verde hacia la adopción generalizada se ve obstaculizado por una serie de dificultades técnicas, económicas y sociales. La aceptación social y las políticas gubernamentales desempeñan un papel crucial en la transición hacia el hidrógeno verde. Examinaremos la necesidad de políticas que fomenten la adopción del hidrógeno verde, considerando también los posibles impactos en la fuerza laboral y en las comunidades afectadas por la transición.

Al entender y abordar estos desafíos, los profesionales de la ingeniería industrial pueden desempeñar un papel clave en el avance y la implementación exitosa de esta estructura crítica hacia un futuro energético sostenible.

2. Introducción

En el contexto del cambio climático y la necesidad apremiante de transiciones hacia fuentes de energía más sostenibles, el Acuerdo de París, adoptado en 2015 por las Naciones Unidas, marcó un hito crucial en la lucha global contra el calentamiento global. Este pacto histórico comprometió a las naciones a trabajar juntas para limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 grados Celsius, con esfuerzos adicionales para limitarlo a 1.5 grados. Sin embargo, la realización de estos objetivos ambiciosos no solo requiere una acción colectiva sino también un enfoque integral hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), delineados en la Agenda 2030.

Dentro de este marco, el ODS 9 destaca la importancia de construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y fomentar la innovación. En particular, se hace hincapié en el papel crucial de las infraestructuras para el desarrollo económico y social sostenible. Sin embargo, para lograr una infraestructura verdaderamente sostenible, es imperativo reconsiderar la matriz energética actual y explorar alternativas que no solo impulsen el desarrollo, sino que también minimicen el impacto ambiental.

En este contexto, la infraestructura energética emerge como un elemento central de discusión. La dependencia histórica de los combustibles fósiles ha exacerbado los desafíos medioambientales, destacando la urgencia de transitar hacia fuentes de energía renovable. En esta encrucijada, el hidrógeno verde surge como una

solución prometedora y versátil. Este gas, producido a través de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, no solo ofrece una forma eficiente de almacenar energía, sino que también puede integrarse en diversas aplicaciones, desde el transporte hasta la industria.

A medida que exploramos el potencial del hidrógeno verde, este documento examina su viabilidad como catalizador para el cumplimiento del ODS 9, propulsando infraestructuras más sostenibles y resilientes. Exploraremos cómo la adopción del hidrógeno verde no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también abre nuevas posibilidades para un desarrollo económico inclusivo y un futuro energético más limpio y eficiente. Sin embargo, a pesar de su potencial revolucionario, la implementación a gran escala ha enfrentado resistencias y desafíos que requieren una cuidadosa consideración.

3. Aspectos técnicos

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, nos adentraremos en los desafíos técnicos que impiden la plena integración del hidrógeno verde en los sistemas energéticos existentes. Problemas relacionados con la producción eficiente, almacenamiento seguro y distribución efectiva son aspectos cruciales que deben abordarse para garantizar la viabilidad a largo plazo del hidrógeno verde. Comenzaremos por abordar los métodos de producción de hidrógeno, y veremos los porcentajes de generación actual. Luego veremos los problemas asociados a su transporte y almacenamiento, y finalmente veremos los desafíos que tiene en cuanto a su principal aplicación, como combustible para el transporte, reemplazando a los vehículos eléctricos y a los hidrocarburos.

3.1. Producción de H₂

Los diversos métodos de producción de hidrógeno se clasifican por colores. Los principales colores se resumen en el gráfico que se presenta a continuación.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SUS COLORES

by CIC
energigUNE
MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE

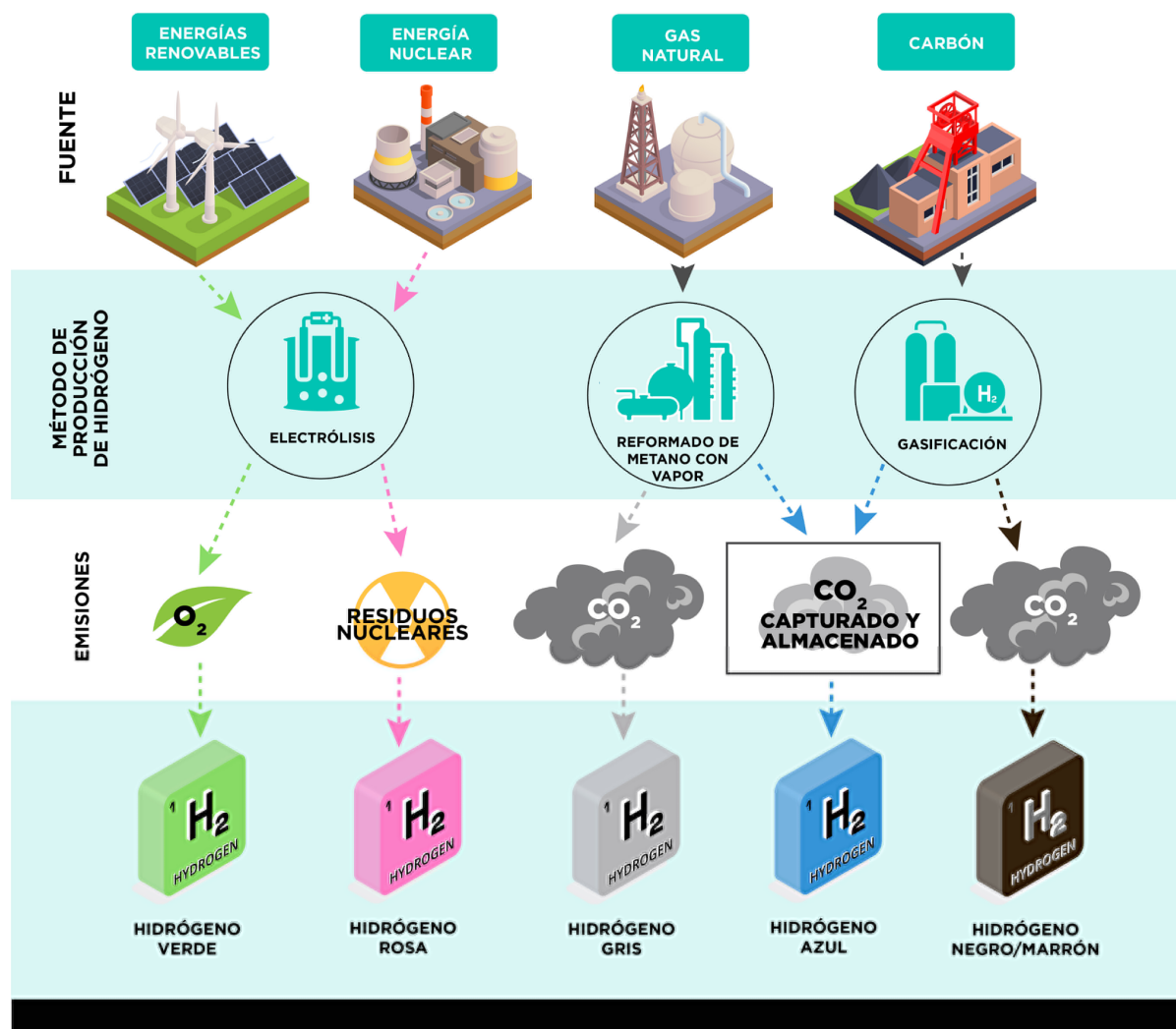


Figura 1. Colores del hidrógeno. Extraído de la web del Centro de Investigación para Almacenamiento de Energía Electroquímica y Térmica (iniciativa estratégica del Gobierno Vasco). <https://cicenergigune.com/>

a. Gris: La mayor parte de la producción mundial de hidrógeno se basa en el reformado de metano con vapor, proceso en el que se utiliza vapor a alta temperatura (700 °C–1000 °C) para producir hidrógeno a partir de una fuente de metano, como el gas natural. El metano reacciona con el vapor a una presión de 3–25 bar (1 bar = 14,5 psi) en presencia de un catalizador para producir hidrógeno, monóxido de carbono y una cantidad relativamente pequeña de dióxido de carbono. El reformado con vapor es endotérmico, es decir, se debe suministrar calor al proceso para que se produzca la reacción.

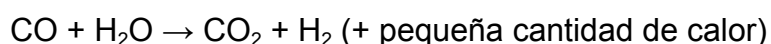
Posteriormente, en lo que se llama la "reacción de cambio de agua-gas", el monóxido de carbono y el vapor reaccionan usando un catalizador para producir dióxido de carbono y más hidrógeno. En un paso final del proceso llamado

"adsorción por oscilación de presión", el dióxido de carbono y otras impurezas se eliminan de la corriente de gas, dejando esencialmente hidrógeno puro. El reformado con vapor también se puede utilizar para producir hidrógeno a partir de otros combustibles, como etanol, propano o incluso gasolina.

Reacción de reformado de metano con vapor:



Reacción de desplazamiento agua-gas:



Las tecnologías utilizadas no capturan las emisiones de carbono generadas durante el proceso, sino que se liberan a la atmósfera.

b. Azul: El hidrógeno azul también se extrae mediante el proceso de reformado con vapor, pero se diferencia del gris en que las emisiones de carbono liberadas se capturan y almacenan, lo que reduce las emisiones a la atmósfera, pero no las elimina. El hidrógeno azul a veces se denomina "hidrógeno bajo en carbono", ya que el proceso de producción no evita la creación de gases de efecto invernadero, simplemente los almacena.

c. Verde: El hidrógeno verde no genera emisiones en todo su ciclo de vida ya que utiliza energías renovables en el proceso de producción, lo que lo convierte en una verdadera fuente de energía limpia. Se fabrica electrolizando agua utilizando electricidad limpia creada a partir de energía renovable excedente de la energía eólica y solar. El proceso provoca una reacción que divide el agua en sus componentes de hidrógeno y oxígeno (el H y el O en H₂O). Esto da como resultado que no se liberen emisiones de carbono en el proceso. Es una excelente alternativa al gris y azul, pero por ahora el principal desafío es reducir los costos de producción del hidrógeno verde para convertirlo en una alternativa renovable y respetuosa con el medio ambiente verdaderamente obtenible.

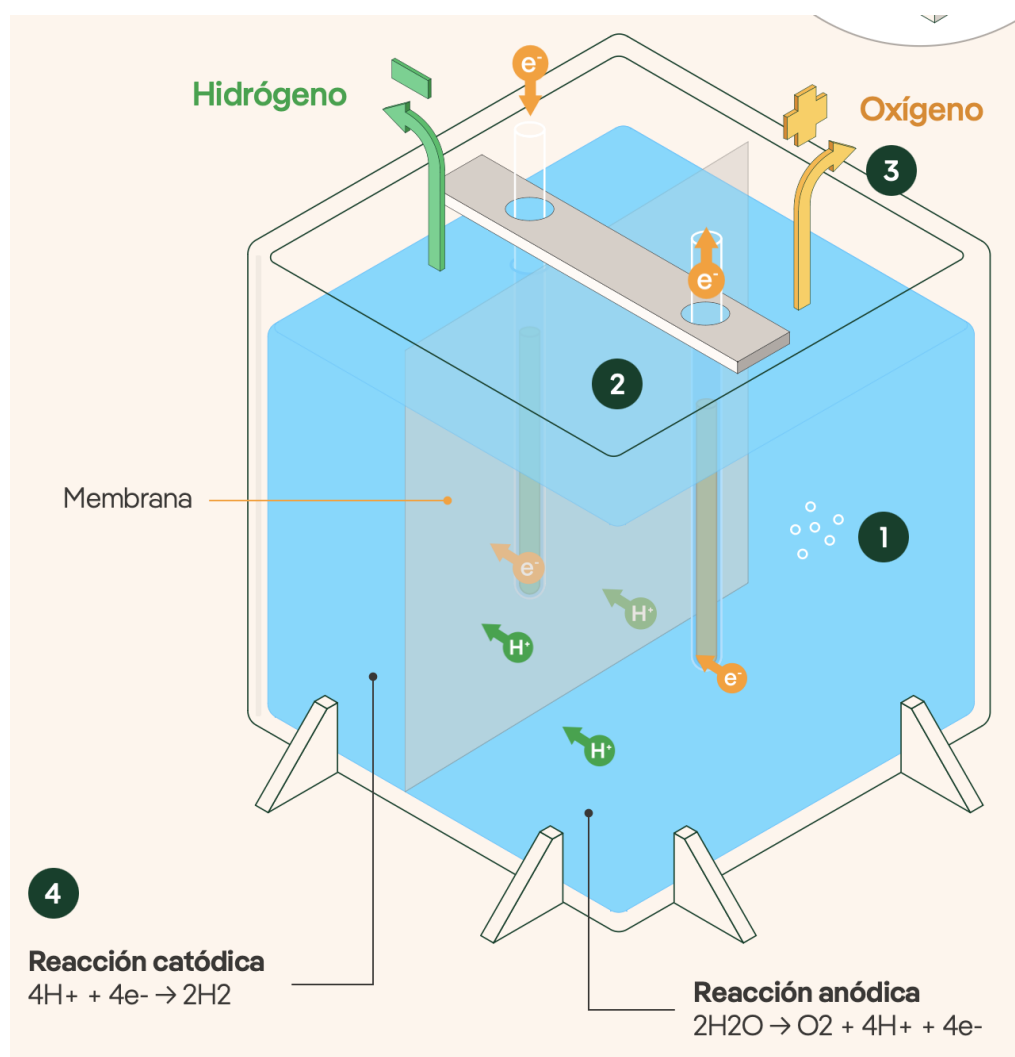


Figura 2. Reacción electrolisis. Fuente: Departamento de Energía de EE.UU. y Wood Mackenzie

d. Negro / marrón: El hidrógeno negro y marrón se crea utilizando cualquier tipo de carbón en el proceso de extracción. Este proceso, llamado gasificación, es el proceso en el extremo opuesto del espectro de la electrólisis del hidrógeno verde. Es un proceso establecido utilizado en muchas industrias que convierten materiales ricos en carbono en hidrógeno y dióxido de carbono. Las emisiones luego se liberan al aire, causando contaminación y convirtiéndose en el hidrógeno más dañino para el medio ambiente.

e. Rosa: El hidrógeno rosa se extrae mediante electrólisis alimentada por energía nuclear. Es posible que escuche que el hidrógeno rosa también se conoce como hidrógeno púrpura o rojo.

3.1.1. Estadísticas de producción de H_2

Actualmente, el 99 % de la producción de hidrógeno de EE. UU. proviene de combustibles fósiles, con un 95 % de reformado gas natural y un 4 % por

gasificación del carbón. Solo el 1 % del hidrógeno de EE. UU. se produce a partir de la electrólisis. Anualmente, Estados Unidos produce más de 10 millones de toneladas métricas (MMT) de hidrógeno, y aproximadamente el 60 % se produce en instalaciones de producción de hidrógeno "dedicadas" como su producto principal.

La producción mundial de hidrógeno es de aproximadamente 70 MMT, con un 76 % producido a partir de gas natural , un 22 % mediante gasificación de carbón (principalmente en China) y un 2 % mediante electrólisis.

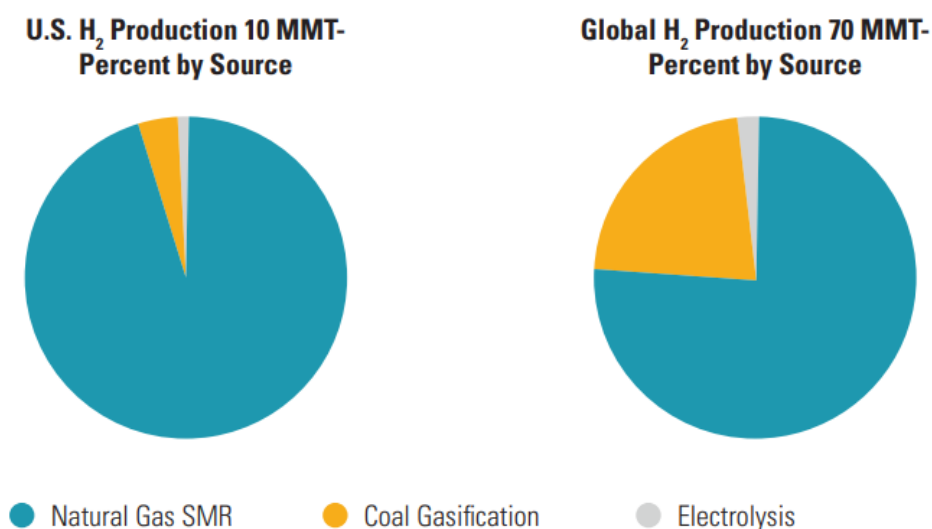


Figura 3: Producción total de hidrógeno en Estados Unidos y mundo según el método. Extraído del informe Hydrogen Strategy del U.S. Department of Energy.

Como se puede apreciar, predomina el uso de los métodos de reformado de gas natural y gasificación de carbón, pero no se aclara en qué proporción es hidrógeno "azul". La electrólisis representa sólo el 2% de lo producido mundialmente. Tampoco se aclara si esto es hidrógeno verde o rosado. De cualquier manera, vemos que la proporción de hidrógeno verde es ínfima actualmente en el mundo.

3.2. Almacenamiento, transporte y distribución

Uno de los temas que más preocupan al hablar de la economía del hidrógeno es su almacenamiento. Este es un problema aún sin resolver. Las tecnologías de almacenamiento del hidrógeno tienen que mejorar significativamente para que el establecimiento de un sistema basado en el hidrógeno sea posible. Se podría hablar de dos tipos fundamentales de almacenamiento, el estacionario y el no estacionario. El primero sería el que se tendría en los puntos de producción, en los puntos de distribución y en los puntos de consumo estacionario. El segundo grupo sería el almacenamiento para la distribución y el almacenamiento para consumo durante el transporte. Este último es el que más preocupa, ya que el almacenamiento del combustible a bordo no debería de ocupar un espacio excesivo ni representar un alto porcentaje del peso del vehículo. De hecho una de las mayores barreras para

generalizar la aplicación de la propulsión basada en el hidrógeno, es el desarrollo de un sistema de almacenamiento a bordo que pueda suministrar una cantidad suficiente de hidrógeno con un volumen, peso, coste y seguridad aceptables. La mayoría de los métodos de almacenamiento de hidrógeno establecidos tienen ventajas y desventajas, pero ninguno, hasta la fecha, es claramente superior al resto. Las elecciones de sistemas de almacenamiento de hidrógeno viables se limitan a las siguientes:

a. Hidrógeno comprimido: Debido a su baja densidad energética por unidad de volumen (12MJ/m^3), el hidrógeno gas es normalmente almacenado bajo altas presiones, en un rango entre 200-700 bar. La compresión del hidrógeno hasta 350 bar consume alrededor del 20% de la energía contenida en el hidrógeno. Se necesita el uso de contenedores a presión especialmente contruidos para este fin, los cuales son caros y pesados. El almacenamiento del hidrógeno en forma de gas comprimido tiene grandes retos en las áreas de relativamente baja densidad energética, coste del sistema, resistencia de impacto y empaquetamiento en vehículos. Actualmente los tanques de almacenamiento de gas a alta presión consisten en un revestimiento interior hecho de un polímero como una malla de polietileno o nylon cubierta con una fibra continua de grafito y capa de reforzamiento epoxy. Sin embargo, el hidrógeno tiene una alta tasa de permeabilidad a través de estos revestimientos poliméricos. Dicha penetración no sólo genera una pérdida gradual de la presión de hidrógeno, sino que además el hidrógeno al salir puede dañar y debilitar la capa de reforzamiento del tanque. Este debilitamiento podría generar una fatiga cíclica u otros fallos en el tanque. Una solución a este problema sería desarrollar una barrera de difusión de hidrógeno que pueda ser aplicada al revestimiento interior polimérico.

b. Hidrógeno Líquido: El hidrógeno criogénico (23K), se obtiene a partir de la licuación del mismo. La licuación es el proceso de pasar un gas a líquido por medio de modificar sus condiciones de presión y temperatura. El proceso de licuación utiliza una combinación de compresores, intercambiadores de calor y válvulas de expansión para lograr el enfriamiento necesario. El proceso de licuación más simple es el ciclo de Linde o ciclo de expansión de Joule-Thompson.

La molécula de hidrógeno existen en dos formas, *para* y *orto*, dependiendo de la configuración de los electrones en los dos átomos individuales. En el punto de ebullición, es decir a 20K, la concentración de equilibrio es prácticamente todo *para*-hidrógeno, pero a temperatura ambiente o superior, el equilibrio de la concentración es de un 25% *para*-hidrógeno y de un 75% *orto*-hidrógeno. Si la licuación del hidrógeno se produce de forma rápida, el hidrógeno puede estar licuado, pero todavía contener importantes cantidades de *orto*-hidrógeno. Este se convierte con el tiempo en *para*-hidrógeno a través de una reacción exotérmica. Esto supone un problema ya que el almacenamiento de larga duración de hidrógeno líquido requerirá la conversión del hidrógeno de su forma *orto* a su forma *para* para

minimizar las pérdidas por evaporación. Esto se puede llevar a cabo utilizando una serie de catalizadores entre los que se encuentran el carbón activo, el óxido férrico, compuestos de uranio, óxido crómico, y algunos compuestos de níquel.

Cualquier evaporación, supondrá una pérdida neta en la eficiencia del sistema, debido al trabajo necesario para licuar ese hidrógeno, pero las pérdidas pueden ser mayores, si el hidrógeno es liberado a la atmósfera en lugar de ser recuperado. La primera medida para evitar las pérdidas por evaporación flash es ejecutar la conversión de orto-hidrógeno a para-hidrógeno durante la etapa de licuación, para evitar cualquier conversión y la evaporación posterior durante el almacenamiento. Otra medida importante para prevenir la evaporación flash es utilizar contenedores criogénicos aislados. Los contenedores criogénicos, están diseñados para minimizar la transferencia de calor por conducción, convección y radiante desde la pared exterior del contenedor hasta el líquido. Todos los contenedores criogénicos tienen una doble pared y entre ellas el vacío, esto prácticamente elimina las transferencias de calor por conducción y convección. Para evitar la transferencia de calor radiante se ponen capas reflexivas de baja emitancia, normalmente plástico aluminado Mylar o perlita (silicona coloidal) colocadas entre las paredes del tanque. Algunos contenedores grandes, tienen además, una pared exterior con un espacio relleno de nitrógeno líquido. Esto reduce la transferencia de calor disminuyendo la diferencia de temperaturas.

c. Hidruros metálicos: Los hidruros metálicos son un grupo bien conocido de materiales que absorben hidrógeno reversiblemente en unas condiciones moderadas. Estos tienen dos problemas prácticos principales cuando se utilizan para el almacenamiento de hidrógeno. En primer lugar, los hidruros metálicos, en general, se rompen en finas partículas después de repetidas absorciones y liberaciones de hidrógeno. Y en segundo lugar, son sensibles a las impurezas reactivas como el oxígeno y el monóxido de carbono. Pequeños niveles de estas impurezas, los pueden inactivar para absorber hidrógeno. Una solución propuesta para estos problemas es la de romper el hidruro metálico en finas partículas, y encapsularlas en una matriz porosa de sílice para formar un material compuesto. La porosidad de la matriz permite que el hidrógeno alcance las partículas de hidruro metálico, pero impide la penetración de grandes moléculas de impurezas. Además debe ser lo suficientemente resistente y tener espacio para que las partículas de hidruro metálico se expandan y contraigan para que la absorción y liberación del hidrógeno no suponga la rotura de los gránulos.

d. Nanoestructuras de carbono: La absorción física en sólidos muestra grandes ventajas, tales como el uso de materiales de bajo coste, y las bajas presiones de operación. Debido a su gran área superficial, a su baja densidad y un gran volumen de poros, las nanoestructuras de carbono están presentando un gran potencial como material de almacenamiento del hidrógeno. El grafito es la forma más comúnmente disponible de carbono. El hidrógeno y el grafito interactúan de forma

muy débil, lo cual es positivo, puesto que el almacenamiento es temporal, sin embargo, las láminas de carbono se apilan de forma muy compacta, lo que impide que las moléculas de hidrógeno quepan entre dichas láminas, y por lo tanto disminuyen la capacidad de absorción. Dentro de las distintas configuraciones de nanoestructuras de carbono para almacenamiento de hidrógeno las principales líneas de investigación son: las nanofibras de grafito (GNF), los nanotubos de carbono de pared simple (SWNT) y los nanotubos de carbono de pared compuesta (MWNT)

e. Almacenamiento subterráneo de hidrógeno gaseoso: Un caso especial de almacenamiento, es el uso de grandes cavidades subterráneas similares a las que actualmente se usan para almacenar el gas natural. Las cantidades de energía almacenadas tienen potencial de abastecer las necesidades de grandes poblaciones durante largos periodos de tiempo, como puede ser la necesidad de asegurar el suministro o para regular las variaciones estacionales de producción. Para el almacenamiento subterráneo es necesario una gran cueva o roca porosa con una capa de cierre impermeable. Una capa de roca saturada con agua, es un buen ejemplo de capa de cierre. Otras posibilidades son pozos abandonados de gas natural, o cuevas realizadas por el hombre. Los dos métodos de almacenamiento subterráneo que son adecuados tanto para el hidrógeno como para el gas natural son el uso de cavidades usadas con anterioridad por la minería, y acuíferos vacíos.

Esto puede ofrecer una solución eficaz para superar uno de los principales inconvenientes de las energías renovables: la intermitencia en su producción, que no siempre coincide con los incrementos de la demanda.

Así, en periodos de baja demanda energética, el excedente de energía producido por fuentes renovables se puede destinar a obtener hidrógeno verde mediante electrólisis, hidrógeno que se almacenaría bajo tierra para su posterior conversión en electricidad en épocas de alta demanda, con unas emisiones asociadas de CO₂ casi nulas. El gas almacenado también podría ser utilizado para su uso en el transporte y las industrias con una alta demanda energética, como la química o el acero.

Estas reservas de energía en forma de hidrógeno pueden ser útiles, por ejemplo, para mantener la estabilidad en los precios de la electricidad en situaciones imprevistas que generan una altísima demanda energética, como las olas de frío en invierno o de calor en verano.

3.3. Aplicación del h₂ en el transporte

En la búsqueda continua de soluciones energéticas sostenibles para el sector del transporte, el hidrógeno emerge como un candidato prometedor que redefine la movilidad con un enfoque innovador. En particular, la aplicación del hidrógeno como fuente de energía para el transporte plantea la interesante dicotomía entre dos

tecnologías distintas: los motores de combustión interna que aprovechan directamente el hidrógeno y las celdas de combustible que generan electricidad a partir de este elemento. Este análisis comparativo no solo se sumerge en las complejidades técnicas y eficiencia de ambas tecnologías, sino que también desentraña las implicaciones ambientales y económicas que cada enfoque conlleva, delineando así el camino hacia un futuro de movilidad más limpio y sostenible.

3.3.1. Tecnología de celdas de hidrógeno

Las celdas de combustible de membrana de electrolito de polímero (PEM) que se utilizan en los automóviles, también llamadas celdas de combustible de membrana de intercambio de protones, usan combustible de hidrógeno y oxígeno del aire para producir electricidad. La figura a continuación muestra cómo funciona una celda de combustible PEM.

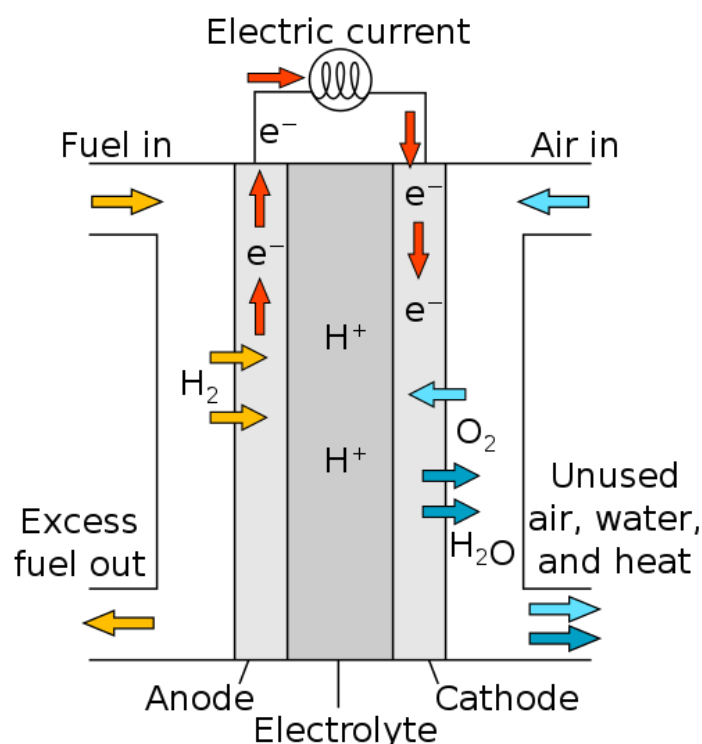


Figura 4. Celda de hidrógeno. Extraída de <https://rosetta-technology.com/>.

La mayoría de las celdas de combustible diseñadas para su uso en vehículos producen menos de 1,16 voltios de electricidad, lo que dista mucho de ser suficiente para alimentar un vehículo. Por lo tanto, múltiples celdas deben ensamblarse en una celda de combustible. La energía potencial generada por una pila de celdas de combustible depende del número y tamaño de las celdas de combustible individuales que componen la pila y el área de superficie del PEM.

La celda cuenta con dos electrodos, un ánodo y un cátodo. El oxígeno pasa sobre un electrodo y el hidrógeno sobre el otro. El hidrógeno se pone en contacto con una lámina

de platino o paladio, que permite la separación de dicho hidrógeno en un electrón y un protón. El flujo de electrones generado es utilizado para abastecer de energía al motor eléctrico, y los protones atraviesan la membrana electrolítica, formando agua al combinarse con el oxígeno. La eficiencia de una celda de combustible de hidrógeno, en conjunto con el inversor y el motor eléctrico, ronda el 50%

3.3.2. Combustión interna

Como ya mencionamos, el hidrógeno puede ser utilizado directamente como combustible en motores de ciclo Otto, pero está sujeto a ciertas características que suponen inconvenientes para dicha aplicación. Las propiedades que contribuyen a su uso como combustible son:

Amplia gama de inflamabilidad: El hidrógeno tiene un amplio rango de inflamabilidad en comparación con todos los demás combustibles (34:1 - 180:1). Una ventaja significativa de esto es que el hidrógeno puede funcionar con una mezcla fina o pobre.

Baja energía de ignición: La cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es de aproximadamente un orden de magnitud menor que el requerido para la gasolina. Esto hace que los puntos calientes en el cilindro puedan servir como fuentes de ignición, creando problemas de ignición prematura y retroceso de llama. Prevenir esto es uno de los desafíos asociados con hacer funcionar un motor con hidrógeno. El amplio rango de inflamabilidad de hidrógeno significa que casi cualquier mezcla puede encenderse con un punto caliente.

Pequeña distancia de enfriamiento: Las llamas de hidrógeno viajan más cerca de la pared del cilindro que otros combustibles, pudiendo aumentar la tendencia a las contraexplosiones ya que la llama pasa más fácilmente por una válvula de admisión casi cerrada.

Alta temperatura de autoignición: Permite utilizar mayores relaciones de compresión, lo que aumenta la eficiencia térmica del sistema. Por otro lado, el hidrógeno es difícil de encender en una configuración de encendido por compresión o diesel, porque las temperaturas necesarias para esos tipos de ignición son relativamente altas.

Alta velocidad de llama: la velocidad de la llama de hidrógeno es casi una magnitud mayor (más rápido) que la de la gasolina. Esto significa que los motores de hidrógeno pueden acercarse más a un ciclo Otto termodinámicamente ideal.

Alta difusividad: Facilita la formación de una mezcla uniforme de combustible y aire. En segundo lugar, si se desarrolla una fuga de hidrógeno, el hidrógeno se dispersa rápidamente, por lo tanto, las condiciones inseguras pueden evitarse o minimizarse.

Baja densidad: En primer lugar, se necesita un gran volumen para almacenar suficiente hidrógeno para dar un vehículo con una autonomía razonable. En segundo

lugar, la densidad de energía de una mezcla de hidrógeno y aire es menor y, por lo tanto, la potencia de salida es menor.

La eficiencia de un motor de ciclo Otto funcionando con hidrógeno es similar a la de un motor de combustión interna. Desde 2021, Toyota ha desarrollado motores de combustión interna a base de hidrógeno para vehículos de carreras, utilizando el motor 1.5 3 cilindros turbo del Yaris GR, logrando buena potencia y comportamiento similar al obtenido usando gasolina. Durante este año la marca ha pasado a usar almacenamiento en estado líquido para mejorar la autonomía del vehículo, ya que es la principal desventaja del hidrógeno como combustible. Desarrollaremos esto en la sección siguiente.

3.3.3. Autonomía y almacenamiento

Para entender el problema que presenta el hidrógeno debemos analizar su densidad energética. Vemos que la densidad energética por unidad de masa es relativamente buena comparada con la gasolina. La energía que contiene 1 Kg H₂ es similar a la contenida en un galón americano (3,785 L) de gasolina.

El verdadero inconveniente es que al almacenar el H₂ en tanques a presión en estado gaseoso a 700 bar, sólo tenemos una densidad de 0,04 Kg/L H₂. Para realizar una comparativa tangible, si tuviéramos un tanque 60L, el mismo contendría 2,4 Kg de H₂, los cuales equivalen a 9 L de gasolina. Esto, en un vehículo con un consumo promedio de 6 L/100 Km nos daría tan solo 150 Km de autonomía.

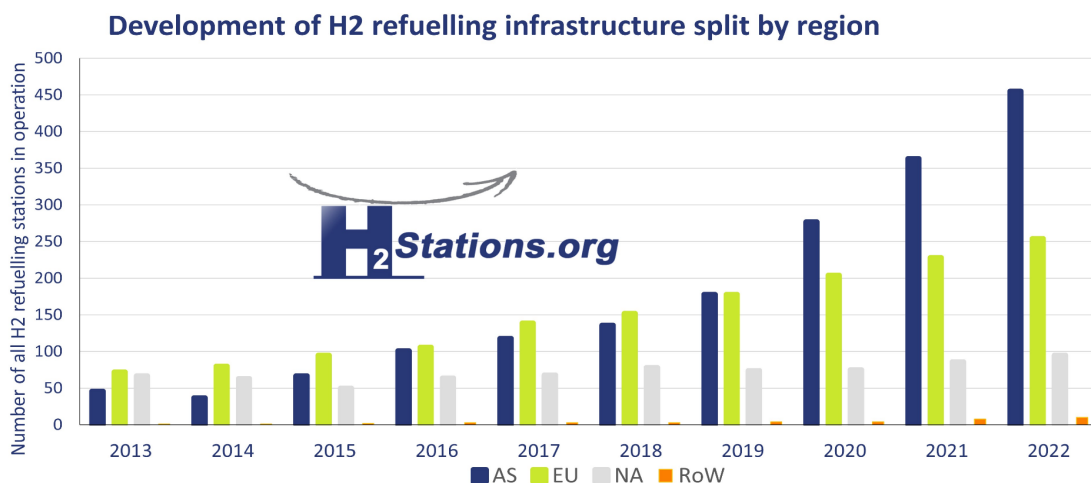
Otra opción sería almacenarlo en estado líquido. Así obtendríamos una densidad significativamente mayor, de 0,07 Kg/L H₂. Esto es un 75% que a 700 bar. Para esto utilizaríamos un tanque de doble pared con alto vacío entre las mismas, y con superficies internas pulidas para minimizar la transferencia de calor por convección y radiación. El problema reside en que al calentarse lentamente el contenido del tanque, la presión aumenta y debemos liberar parte del H₂ por seguridad. Comparando con el ejemplo anterior, 60L H₂ licuado equivalen a 15,75 L de nafta, lo que nos daría una autonomía de 262,5 Km, lo cual es un valor aceptable.

Esto ya se intentó en el BMW Hydrogen 7 (2005-2007). El problema es que a las 17 horas de no utilizar el vehículo, el hidrógeno sale a través de un catalizador que lo combina con O₂ para formar agua. En 10 a 12 días de no uso, el tanque se vacía completamente. Por suerte este vehículo podía funcionar tanto a hidrógeno como a gasolina.

El desarrollo anterior ilustra el problema de la baja densidad energética del hidrógeno almacenado en estado gaseoso. Esto hace que su aplicación sea más factible en camiones y buses, donde el volumen de almacenamiento no es tan acotado, y el peso de los tanques no representa una proporción tan importante en el peso total.

3.3.4. Infraestructura actual del H2 para el transporte

Existe una página web que lleva el seguimiento de la cantidad de estaciones de llenado de hidrógeno a nivel mundial. A modo de resumen tomamos de la página H2Stations.org los datos de cantidad de estaciones por zona, y el mapa donde se ilustra su distribución. Para el año 2022 el número de estaciones en todo el mundo asciende a 814.



Referencias: As: Asia; Eu: Europa; NA: América del norte; RoW: Resto del mundo.

Figura 5. Cantidad de estaciones de hidrógeno por zona. Extraído de <https://www.h2stations.org/>.

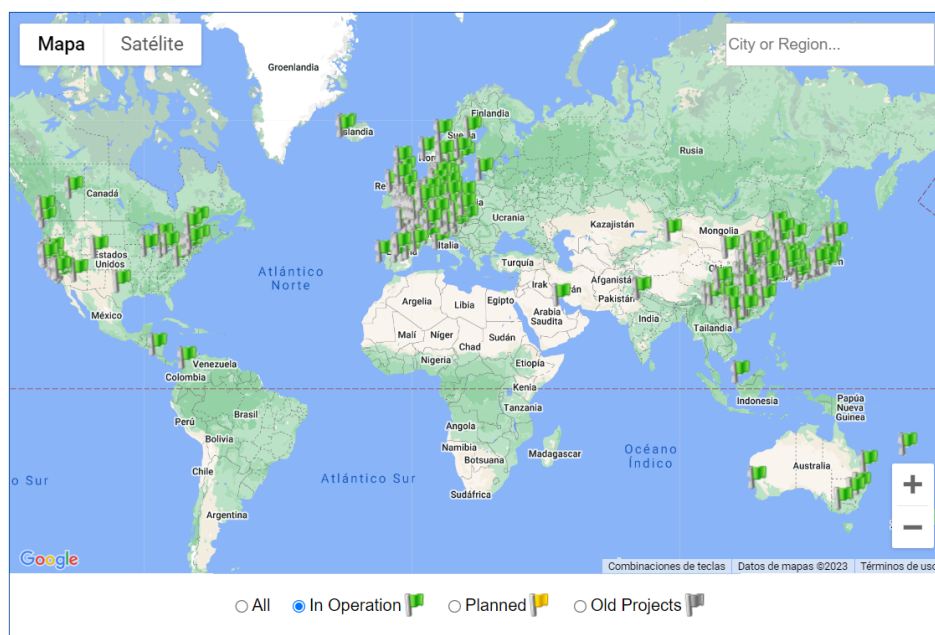


Figura 6. Mapa de estaciones de hidrógeno en operación actual. Extraído de <https://www.h2stations.org/>.

Cabe resaltar que el costo de la infraestructura para instalar una estación de hidrógeno es sustancialmente mayor que el de instalar una estación de carga rápida para autos eléctricos. La mayoría de las estaciones de hidrógeno en los Estados Unidos se encuentran en California debido a que el estado ha sido un líder en la promoción de vehículos de celda de combustible y ha invertido en la construcción de una infraestructura de hidrógeno para apoyarlos. Además, California ha establecido objetivos ambiciosos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha llevado a una mayor inversión en tecnologías de energía limpia, incluida la producción de hidrógeno.

Según un informe de PetrolPlaza, el gobierno de los Estados Unidos tiene como objetivo tener 200 estaciones de hidrógeno en California para 2025 y un total de 1,000 estaciones en el estado para 2030. Actualmente, la mayoría de las estaciones de hidrógeno obtienen hidrógeno gaseoso presurizado, que depende de las estaciones de compresión y de una red de camiones para hacer llegar el H₂ a las estaciones de servicio.

3.4. Desafíos técnicos

a. Dependencia de fuentes renovables: Su producción requiere fuentes renovables de electricidad (eólica, solar, geotérmica, hidráulica). Pero deben mejorar su rentabilidad. Necesitan más inversión en I+D para aumentar su eficiencia, cambios favorables en las regulaciones fiscales, subvenciones, precios, etc., y economías de escala.

b. Almacenamiento: La acumulación de energía en tanques de hidrógeno a través de la electrólisis plantea desafíos en términos de costos, eficiencia y distribución descentralizada. La descentralización de la producción y la gestión de la oferta y la demanda mediante medios cibernéticos complejos también se menciona como un desafío técnico. La densidad energética del H₂ gaseoso es baja para utilizar en vehículos livianos. Sí podría ser utilizada en vehículos de larga distancia o transporte de cargas, donde el volumen de almacenamiento es más generoso.

4. Aspecto económico

4.1. Oportunidades Económicas:

a. Impulso a la Innovación y Empleo: El auge del hidrógeno verde presenta oportunidades económicas significativas, especialmente en términos de innovación y creación de empleo. La transición hacia esta fuente de energía renovable estimula la demanda de tecnologías más eficientes y sostenibles, generando oportunidades para la investigación y desarrollo en el sector. Además, la expansión de la industria del hidrógeno verde podría conducir a la creación de empleos en áreas como la

producción, transporte, almacenamiento y mantenimiento de infraestructuras relacionadas.

b. Diversificación de la Economía: Reducir la dependencia de los combustibles fósiles a través del hidrógeno verde contribuiría a la diversificación de las economías nacionales. Esto puede generar resiliencia ante fluctuaciones en los precios del petróleo y abrir nuevas oportunidades comerciales en el mercado de energía renovable, promoviendo una mayor estabilidad económica a largo plazo.

c. Contribución a la Neutralidad Climática: El hidrógeno verde se presenta como una solución clave en el camino hacia la neutralidad climática, lo que puede tener beneficios económicos a largo plazo. Las inversiones en energías limpias y sostenibles podrían traducirse en una disminución de los costos asociados con eventos climáticos extremos y problemas de salud relacionados con la contaminación, lo que tendría impactos positivos en los sistemas de atención médica y seguros.

4.2. Desafíos Económicos:

a. Costos Iniciales Elevados: Uno de los principales desafíos económicos radica en los costos iniciales asociados con la infraestructura necesaria para la producción y distribución del hidrógeno verde. Las inversiones significativas requeridas pueden representar una carga financiera para gobiernos y empresas, especialmente en un contexto donde la rentabilidad a corto plazo puede ser incierta. El costo de producir hidrógeno en grandes centrales y distribuirlo por gasoductos a consumidores lejanos es alto. Una solución factible es la descentralización de la producción (generación distribuida), reduciendo así el transporte. Esto es factible ya que la energía solar y eólica, necesarias para producir hidrógeno verde, pueden ser distribuidas también. Esto lo convertiría en una infraestructura resiliente, ya que la centralización implica vulnerabilidad ante ataques de cualquier tipo.

b. Competencia con Fuentes Convencionales: El hidrógeno verde debe competir económicamente con las fuentes de energía convencionales, como los combustibles fósiles. Aunque la tendencia apunta hacia una disminución de costos en el futuro, actualmente se enfrenta al desafío de ser más costoso que las opciones tradicionales, lo que podría limitar su adopción masiva.

c. Eficiencia y Pérdida de Energía: Desde una perspectiva económica, la eficiencia del hidrógeno verde plantea preocupaciones. Las pérdidas de energía a lo largo de su cadena de producción y distribución implican mayores costos operativos y podrían afectar su viabilidad económica frente a alternativas más eficientes, como la energía solar y eólica.

d. Financiamiento para Nuevas Infraestructuras: La transición hacia un régimen energético basado en el hidrógeno requerirá inversiones significativas en nuevas infraestructuras. Se plantea la pregunta sobre cómo los países más pobres y endeudados financiarán estas inversiones.

4.3. Perspectivas Futuras:

El éxito económico del hidrógeno verde dependerá en gran medida de cómo se aborden estos desafíos. Las políticas gubernamentales que fomenten la inversión, la innovación y la transición hacia energías renovables desempeñarán un papel clave en su desarrollo. La economía mundial podría beneficiarse a largo plazo de la reducción de costos y la integración efectiva del hidrógeno verde, pero se requerirá una planificación cuidadosa y enfoques estratégicos para superar los obstáculos económicos y maximizar sus beneficios.

5. Desafíos Sociales:

a. Transición Laboral: La adopción del hidrógeno verde plantea desafíos en términos de transición laboral. Las comunidades que dependen de las industrias vinculadas a los combustibles fósiles podrían enfrentar dificultades económicas y sociales durante esta transición. Es crucial implementar políticas y programas que ofrezcan oportunidades de empleo y capacitación para aquellos afectados, asegurando una transición justa y equitativa.

b. Acceso y Equidad: La implementación del hidrógeno verde debe abordar cuestiones de acceso y equidad. Es fundamental garantizar que los beneficios de esta transición energética lleguen a todas las comunidades, evitando la creación de brechas económicas y sociales. El acceso equitativo a la energía y a las oportunidades económicas derivadas del hidrógeno verde es esencial para construir una sociedad más justa.

c. Participación Comunitaria: La participación de las comunidades en la planificación y toma de decisiones es esencial. La falta de participación puede generar resistencia social y conflictos, especialmente si las comunidades afectadas no se sienten involucradas en el proceso de transición. La comunicación abierta y transparente, así como la consideración de las preocupaciones locales, son cruciales para mitigar tensiones sociales.

6. Desafíos Políticos:

a. Marco Regulatorio: La falta de un marco regulatorio claro y coherente puede obstaculizar el desarrollo del hidrógeno verde. La creación de políticas que fomenten la inversión, la investigación y el desarrollo es esencial para impulsar esta

tecnología. Además, los incentivos fiscales y las regulaciones ambientales deben estar alineados para garantizar un impulso efectivo hacia la sostenibilidad.

b. Coordinación Internacional: Dada la naturaleza global de la transición hacia el hidrógeno verde, la coordinación entre países es esencial. La falta de armonización en las políticas y estándares puede generar obstáculos en la producción, transporte y comercio del hidrógeno verde. La diplomacia y la colaboración internacional son necesarias para superar estos desafíos y garantizar una transición fluida y eficiente.

c. Inversiones y Financiamiento: La falta de inversiones y financiamiento adecuado puede ser un obstáculo significativo. Los gobiernos y el sector privado deben colaborar para proporcionar la financiación necesaria para proyectos de investigación, desarrollo y despliegue de infraestructuras de hidrógeno verde. Además, es esencial abordar las preocupaciones sobre la rentabilidad a corto plazo y establecer mecanismos que faciliten la inversión a largo plazo.

d. Educación y Concientización: La falta de educación y concientización pública sobre el hidrógeno verde puede generar resistencia y falta de apoyo. Las políticas deben incluir iniciativas de educación pública que informen sobre los beneficios ambientales, económicos y sociales de esta tecnología. La participación ciudadana y la creación de conciencia son fundamentales para ganar apoyo social.

Dominio de Grandes Empresas y Corporaciones: Se destaca que unas pocas empresas privadas y estatales dominan el mercado global de petróleo y gas. El texto sugiere que, a pesar de la necesidad técnica de una red de generación eléctrica descentralizada, la propiedad de los medios de producción podría permanecer en manos de grandes corporaciones.

Impacto en Relaciones Internacionales: Se menciona que la posible desestabilización política de las monarquías árabes debido a la transición energética representa un escenario de pesadilla. Además, se señala que las diferencias en la productividad entre países podrían generar conflictos comerciales y, posiblemente, conflictos más violentos.

Amenazas a la Seguridad y Bioterrorismo: La referencia a la "policía global" necesaria para contrarrestar el bioterrorismo destaca un desafío político en términos de equilibrar la autonomía local con la seguridad global en un contexto de cambio de régimen energético.

Influencia del Islamismo Integrista: Se plantea la preocupación de que la transición al hidrógeno pueda aumentar la amenaza del islamismo integrista, especialmente si los países productores de petróleo se resisten a la transición debido a sus intereses económicos.

7. Caso particular H2 verde en Argentina

7.1. Proyecto Hidrógeno Verde Fortescue

En noviembre de 2021, la compañía australiana Fortescue anunció una inversión significativa de más de USD 7.000 millones para la implementación de un proyecto de hidrógeno verde (H2V) en Argentina, considerado como una de las fuentes de energía menos desarrolladas y más sostenibles en la actualidad. Este anuncio se realizó durante la cumbre climática COP26 en Glasgow, Escocia, contando con la participación del presidente Alberto Fernández, y fue calificado por el Gobierno como la inversión más relevante del siglo XXI.

Según información reciente de medios nacionales, la empresa ha establecido oficinas en Viedma y en la ciudad de Buenos Aires, esta última ubicada en un moderno edificio en el barrio de Palermo Chico, cercano al Malba. La sede porteña supervisa todas las operaciones de la empresa australiana en América Latina, así como los dos proyectos locales de minería en San Juan, que se iniciaron en 2018.

Paralelamente, la empresa se encuentra en la fase de completar un estudio de impacto socio ambiental, iniciado en septiembre de 2022 con la participación de 60 personas, incluyendo científicos locales de la Universidad del Comahue y del Instituto de Biología de Puerto Madryn. Se espera que dicho estudio concluya en septiembre de este año, abarcando un período de un año para evaluar las condiciones del ambiente, la flora y la fauna a lo largo de las cuatro estaciones.

No obstante, Fortescue reconoce que la progresión del proyecto se ve limitada por la ausencia de una Ley de Hidrógeno Verde, la cual proporcionaría el marco de estabilidad necesario para una inversión a largo plazo. Según reportes, la clave en esta etapa radica en el financiamiento, y la empresa ha presentado su proyecto ante organismos internacionales como el Banco Mundial, el BID, la CAF, así como a los principales bancos privados de Nueva York y el Banco Santander en Europa. Sin embargo, la falta de un marco regulatorio específico en Argentina ha frenado las decisiones.

Informes sugieren que, si bien se elaboró un proyecto de ley durante la gestión de Matías Kulfas en el Ministerio de Producción, la falta de consenso y las diferencias surgidas tras su salida del Gobierno han postergado su presentación. El proyecto contempla la integración de contenido nacional para acceder a beneficios fiscales, siendo este un punto crítico debido a que la mayoría de las tecnologías asociadas se desarrollan en otros países, lo cual complica la viabilidad de la inversión.

Es importante destacar que, ante la demora en la presentación del proyecto y las dificultades económicas, Fortescue ha redirigido su foco hacia un proyecto en el

nordeste de Brasil, en el estado de Ceará, donde se llevará a cabo la construcción de una unidad de desalinización y una planta de hidrógeno verde. La empresa ha destacado que la agilidad en la aprobación del marco regulatorio y otras facilidades en Brasil han posicionado este proyecto como su principal prioridad, desplazando a Argentina a la vigésima posición en su lista de proyectos a nivel mundial.

Entre los requisitos presentados al presidente Alberto Fernández se encuentran el acceso a un dólar competitivo, la exención de impuestos para el desarrollo del parque eólico, y la estabilidad fiscal por un período de 30 años. A pesar de la afirmación positiva del Presidente, no se ha alcanzado una definición concreta hasta el momento, lo que ha llevado a Fortescue a dar prioridad al proyecto en Ceará, Brasil.

Fortescue quiere ser líder en el desarrollo de hidrógeno verde, una energía que prevén que será más demandada en el marco del proceso de descarbonización que lleva adelante Europa.

Se estima que para 2030, los países europeos demandarán unos 20 millones de toneladas de hidrógeno verde, la mitad se producirá en la región y el resto será importada de otros países. Por eso, se trabaja en un acuerdo entre el puerto de Ceará en Brasil y el puerto de Rotterdam en Holanda para los futuros envíos de varias empresas, además de Fortescue.

7.2. Foro Global de Hidrógeno Verde 2023

El primer Foro Global de Hidrógeno Verde se llevó a cabo en la ciudad de San Carlos de Bariloche, Argentina, los días 18 y 19 de mayo de 2023. El evento fue organizado por la Green Hydrogen Organization (GH2), la Provincia de Río Negro (RN) y el Consejo Federal de Inversiones (CFI), con el apoyo de diversas empresas promotoras del tema como son Shell, Toyota e YPF, entre otras. El foro reunió a expertos de todo el país y el mundo para discutir temas relacionados con la producción de hidrógeno verde, su aplicación en procesos industriales, producción de fertilizantes, y similares. También se discutió la creación de una cadena de valor de hidrógeno verde, proyectos y desafíos en el camino hacia una economía de hidrógeno verde sostenible, y la visión al 2030 del desarrollo de la cadena de valor del H2V en Argentina dentro de la transición energética

7.3. Régimen Nacional de Promoción del Hidrógeno Verde

El proyecto de ley que impulsa la producción y uso del hidrógeno verde en Argentina es el Régimen Nacional de Promoción del Hidrógeno Verde. El mismo fue elevado al Congreso por el gobierno argentino y se encuentra en proceso de aprobación. La ley tiene como objetivo promover y fortalecer la producción y el uso del hidrógeno

verde como combustible y vector energético, diversificando la matriz energética en pro de un desarrollo sostenible y consciente con el medio ambiente hacia una descarbonización de la economía. La ley declara de interés nacional la producción del hidrógeno de origen renovable, como combustible y vector de energía y como insumo industrial.

8. Conclusiones

Con base en el análisis, la transición hacia el hidrógeno verde como una estructura crítica en el panorama energético global presenta desafíos significativos, que son necesarios abordarse de manera integral. Aunque el hidrógeno verde ofrece un potencial revolucionario para transformar la matriz energética y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, se enfrenta a obstáculos técnicos, económicos y sociales que requieren atención especial.

Desde el punto de vista técnico, los desafíos comienzan con la producción eficiente de hidrógeno. Aunque existen diferentes métodos, la dependencia predominante de fuentes no renovables, como el gas natural, destaca la necesidad de avanzar hacia procesos de producción más sostenibles, como la electrólisis utilizando energía renovable. La elección entre métodos como el hidrógeno gris, azul o verde tiene implicaciones directas en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la viabilidad a largo plazo del hidrógeno como fuente limpia.

El almacenamiento de hidrógeno, como pieza clave en el uso de las energías limpias, destaca la importancia de superar los desafíos inherentes a las tecnologías actuales, ya sea mediante almacenamiento de hidrógeno comprimido, líquido criogénico, hidruros metálicos, nanoestructuras de carbono, almacenamiento subterráneo de hidrógeno gaseoso. Estas tecnologías presentan limitaciones significativas en eficiencia, costos y seguridad, lo que subraya la necesidad de una continua innovación en el campo del almacenamiento.

En este contexto, el almacenamiento a gran escala emerge como una aplicación crucial en periodos de alta demanda energética generando una estructura mas eficiente, capaz de sustituir eficientemente la energía eléctrica, cuya difícil tarea de almacenamiento se complica, aún más en un panorama futuro centrado en el uso de energías renovables.

La innovación continua en las tecnologías de almacenamiento es esencial para superar los obstáculos existentes y aprovechar al máximo el potencial del hidrógeno como vector energético.

Además, la aceptación social y las políticas gubernamentales son factores cruciales que influyen en la adopción de esta nueva fuente de energía. Las políticas deben

fomentar la transición hacia el hidrógeno verde, teniendo en cuenta los posibles impactos en la fuerza laboral y en las comunidades afectadas por la transformación.

9. Bibliografía

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: en la mitad del camino hacia 2030. Objetivos, metas e indicadores (LC/PUB.2023/13-P), Santiago.
- Acciona Australia. (16 de Junio de 2022). What Are The Colours Of Hydrogen And What Do They Mean? ACCIONA. Recuperado 18 de Mayo, 2023, de <https://www.acciona.com.au/updates/stories/what-are-the-colours-of-hydrogen-and-what-do-they-mean/>
- College of the Desert. (Diciembre de 2001). Module 3: Hydrogen Use in Internal Combustion Engines. www1.eere.energy.gov. Recuperado 12 de Mayo, 2023, de https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf
- H2 Stations. (n.d.). Hydrogen refuelling stations worldwide. H2Stations.org. Recuperado 15 de Mayo, 2023, de <https://www.h2stations.org/>
- Ministerio de Economía Argentina. (18 de Enero de 2022). Energías Renovables Gran Escala 2021. Argentina.gob.ar. Recuperado 18 de Mayo, 2023, de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/01/energias_renovables_2021_se-c.pdf
- Rosetta Technology Solutions. (4 de Marzo de 2021). Pilas de Combustible de Hidrógeno ¿Cómo funcionan? | Rosetta. Rosetta Technology Solutions. Recuperado 18 de Mayo, 2023, de <https://rosetta-technology.com/es/aula-tecnica/notas-tecnicas/pila-combustible-hidrogeno-como-funcionan>
- U.S. Department of Energy. (24 de Julio 2020). HYDROGEN STRATEGY Enabling A Low-Carbon Economy. Department of Energy. Recuperado 18 de Mayo, 2023, de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July2020.pdf
- Biblioteca Universidad de Sevilla. (n.d.). Almacenamiento del Hidrógeno. Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.2+Almacenamiento+del+Hidr%C3%B3geno.pdf>

- Cámara de Diputados de la Nación Argentina. (2023). Proyecto de Ley 3878-D-2023. Recuperado de <http://www.hcdn.gob.ar>
- Bariloche2000. (n.d.). Hidrógeno verde: se cae la inversión de Fortescue en Río Negro. Recuperado de <https://www.bariloche2000.com/noticias/leer/hidrogeno-verde-se-cae-la-inversion-de-fortescue-en-rio-negro-/146918>
- UNIDO. (n.d.). COP27: UNIDO to support new Global Renewable Hydrogen Forum. Recuperado de <https://www.unido.org/news/cop27-unido-support-new-global-renewable-hydrogen-forum>
- PetrolPlaza. (n.d.). Recuperado de <https://www.petrolplaza.com/news/29328>
- Energías Renovables. (16 de Noviembre de 2018). Hidrógeno: un gran aliado para almacenar las energías renovables. Recuperado de <https://www.energias-renovables.com/eficiencia/hidrogeno-un-gran-aliado-para-almacenar-las-20181116>