

HIDRÓGENO COMO NUEVO VECTOR ENERGÉTICO: PRESENTE Y FUTURO

ISABEL LADO TOURIÑO

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño
UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

La energía está ligada de modo indisoluble a nuestra vida diaria y es necesaria para realizar prácticamente todas las actividades humanas. El ritmo de crecimiento de la población mundial, así como el aumento de la calidad de vida, están dando lugar a una demanda de energía que es cada vez mayor. Sin embargo, hoy en día, más del 80% de toda la energía que se consume procede de combustibles fósiles tales como el petróleo, el gas natural o el carbón. La dependencia excesiva de dichos combustibles se ha convertido en un problema crítico en la economía actual, ya que sus reservas se están agotando y su utilización como fuentes de energía lleva asociados numerosos efectos negativos sobre el medio ambiente. Es imperativa, por lo tanto, la búsqueda de una fuente de energía barata y más sostenible para reemplazar el sistema actual de combustibles fósiles. El hidrógeno, debido a sus propiedades excepcionales, se ha posicionado con fuerza como vector energético del futuro. Este artículo explica los motivos de tal posicionamiento y describe los principales métodos de obtención, almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como su aplicación más importante en el sector de la energía: las pilas de combustible.

PALABRAS CLAVE •

hidrógeno, vector energético, pilas de combustible, sostenibilidad

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO •

Lado Touriño, Isabel. 2021. "Hidrógeno como nuevo vector energético: presente y futuro" en: UEM STEAM Essentials

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial y una sociedad cada vez más industrializada, especialmente en los países en vías de desarrollo, han provocado un aumento cada vez mayor en la demanda de energía, tal y como se observa en la **figura 01**. Se estima que el consumo anual de energía a nivel mundial supera los 170.000 teravatios-hora, lo que significa un consumo diario del orden de 10^{18} julios (Smil, 2017) es decir, lo que gastan cien mil millones de neveras durante una hora de funcionamiento. Los combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural o el carbón, proporcionan más del 80% de toda esa energía (Caetano, 2017). La dependencia

excesiva de dichos combustibles se ha convertido en un grave problema debido a dos razones principales:

- » Disminución de sus reservas: se estima que el petróleo se agotará en unos 40 años, el gas natural en unos 60 años y el carbón en unos 150 años (Midilli, 2005).
- » Emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, que contribuyen en gran medida al calentamiento del planeta (Johnsson, 2018).

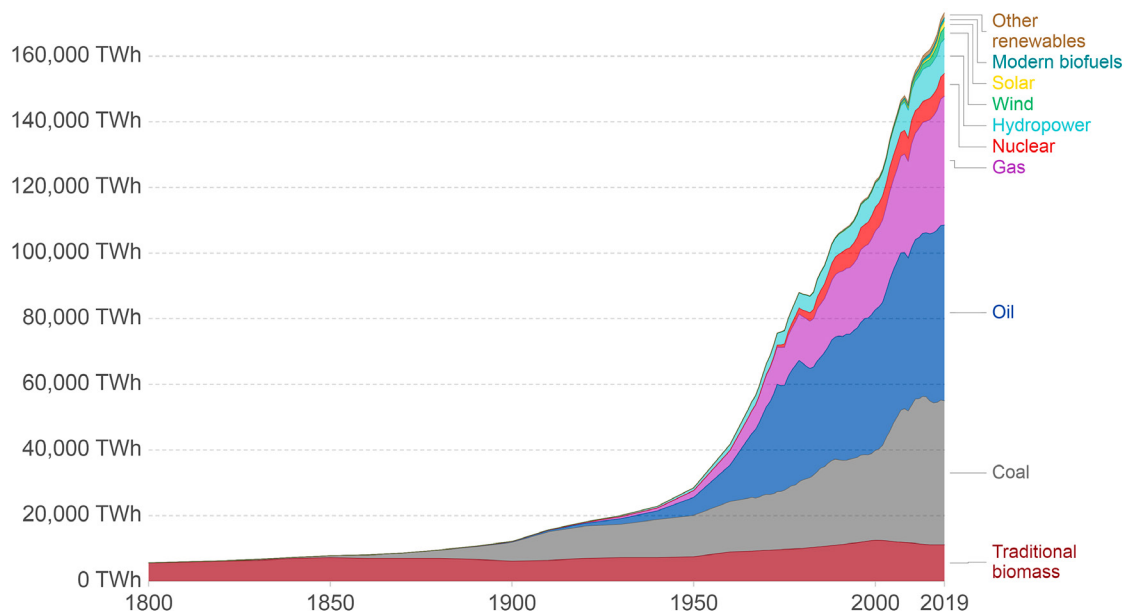


Figura 01 » Evolución de la demanda energética mundial de 1800 a 2019. (Fuente: Vaclav Smil (2017) & BP's Statistical Review of World Energy bajo CC BY 2.0)

Es necesario, por lo tanto, modificar el modelo energético vigente, y el principal medio para lograrlo es la llamada **transición energética sostenible**, es decir, el cambio del sistema energético actual basado en los combustibles fósiles, a otro basado en fuentes renovables que conlleven asociadas emisiones de carbono bajas o nulas.

Debido a sus propiedades excepcionales, el hidrógeno renovable es un actor clave para la sustitución de los combustibles fósiles y el proceso de descarbonización del sector energético. Se trata de un combustible con un elevado contenido energético, inagotable y limpio, ya que, a diferencia de los combustibles fósiles, el único producto que genera durante su combustión es el agua. Es, además, una sustancia que puede generarse en cualquier punto en que se necesite, es decir, es una fuente energética local y no tiene, por lo tanto, los problemas de centralización asociados a otros combustibles. Así, un modelo descentralizado permite una generación de energía que se adscribe a una región concreta, fomentando su autosuficiencia y el aprovechamiento de las fuentes locales, con el consiguiente beneficio social y económico para dicha región.

Sin embargo, a pesar de sus características tan prometedoras, existen numerosos problemas técnicos, asociados sobre todo a su producción y almacenamiento, que es necesario resolver para lograr un sistema energético basado en el hidrógeno (Ren, 2017). Hay que señalar que el hidrógeno no es una fuente de energía primaria sino un **vector energético**, es decir, una sustancia capaz de almacenar energía que puede ser liberada posteriormente de forma gradual y cuando sea requerida. Los vectores energéticos se diferencian de las fuentes de energía primarias (tales como la energía solar o la eólica) en el hecho de que se trata de productos manufacturados, en los que previamente se

ha invertido una determinada cantidad de energía para su elaboración. Así, para poder utilizar la energía contenida en el hidrógeno es necesario producirlo, almacenarlo, transportarlo y someterlo a los procesos adecuados para extraerla.

En las secciones siguientes se describen las propiedades más relevantes del hidrógeno para su uso como vector energético, sus diversos modos de producción y almacenamiento con las ventajas e inconvenientes asociados a cada uno de ellos, los principales medios para transportarlo y, finalmente, su aplicación más importante en el sector de la energía: las pilas de combustible.

HIDRÓGENO: EL NUEVO VECTOR ENERGÉTICO

1 » Propiedades

El hidrógeno es el elemento químico más simple del sistema periódico y, aunque es el más abundante en el universo (75% de la materia visible), no existe de forma elemental en la tierra (0,9% de la corteza terrestre), sino que se encuentra ligado a otros átomos formando compuestos, por ejemplo, agua o hidrocarburos. Por lo tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza y es necesario producirlo. En condiciones normales, es decir, a 25° C y una atmósfera de presión, forma el gas diatómico H₂, que es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. La energía por unidad de masa contenida en la molécula de H₂ es muy elevada, lo cual es una de las razones principales por las que se ha posicionado como vector energético líder en la sociedad del futuro. En la **tabla 01** se recoge la equivalencia másica y volumétrica entre el H₂ y otros combustibles, es

	HIDRÓGENO	GASOLINA	GASÓLEO	METANOL
kilogramos	1	2,78	2,80	6,09
litros	1	0,27	0,24	0,43

Tabla 01 » Equivalencia másica y volumétrica entre el H₂, la gasolina, el gasóleo y el metanol.

decir, la masa y el volumen necesarios de cada uno de ellos para obtener la misma cantidad de energía:

Además de su elevado contenido energético por unidad de masa, el hidrógeno, cuando reacciona con el oxígeno para liberar su energía, no genera gases contaminantes ya que su único producto de reacción es el agua, y debido a su ligereza tiende a dispersarse con facilidad en caso de accidente. Como inconvenientes cabe destacar que, su llama es casi invisible, por lo que resulta difícil de detectar y de extinguir en caso de fuego o explosión, y que, debido a su gran poder de difusión (la capacidad que tiene una sustancia de propagarse de unos medios a otros), la proporción de pérdidas o escapes de hidrógeno gas es de 3 a 5 veces mayor que las del metano o el gas natural. Otro aspecto negativo que sería necesario considerar en caso de que el hidrógeno sustituyese a los combustibles fósiles utilizados en el sistema energético actual, es el de una generación excesiva de vapor de agua (resultado de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, tal y como se ha comentado anteriormente), y que en algunas aplicaciones sería expulsado directamente a la atmósfera. No hay que olvidar que el vapor de agua también es un gas que puede contribuir al efecto invernadero, de modo que, un incremento descontrolado de los niveles de agua en la atmósfera, podría originar cambios climáticos que ocasionarían fenómenos meteorológicos extremos.

2 » Producción

El hidrógeno se extrae de los compuestos de los cuales se encuentra formando parte y en función del método de extracción se puede clasificar en los siguientes tipos (Noussan, 2020):

» **Hidrógeno renovable o verde:** generado a partir de agua y electricidad renovable mediante un proceso de electrolisis (ruptura de la molécula de agua mediante el paso de una corriente eléctrica). En la actualidad, sólo el 4% del hidrógeno se obtiene mediante este método. También se genera a través de otros procesos como la conversión bioquímica de la biomasa (conjunto de procesos biológicos y termoquímicos que transforman la biomasa en H₂ y otros compuestos), siempre que se cumplan los requisitos de sostenibilidad establecidos.

» **Hidrógeno gris:** producido a partir de gas natural u otros hidrocarburos como el metano, mediante procesos

de reformado (tratamiento de los hidrocarburos con vapor de agua a temperatura elevada y presiones moderadas), oxidación parcial (oxidación incompleta de un hidrocarburo) y gasificación del carbón (reacción de carbón con agua y oxígeno para generar el llamado gas de síntesis (mezcla de H₂ y CO)). La mayor parte del hidrógeno generado en la actualidad se obtiene mediante reformado. Este método produce emisiones elevadas de CO₂.

» **Hidrógeno azul:** obtenido de forma similar al hidrógeno gris, pero aplicando al mismo tiempo técnicas de captura y almacenamiento de CO₂, lo que permite reducir hasta en un 95% sus emisiones.

En la **figura 02** se esquematizan los diferentes métodos de producción en función del tipo de hidrógeno generado.

Aunque muchas industrias químicas suelen utilizar hidrógeno como reactivo intermedio para la síntesis de otros productos, sus costes de producción actuales son demasia-

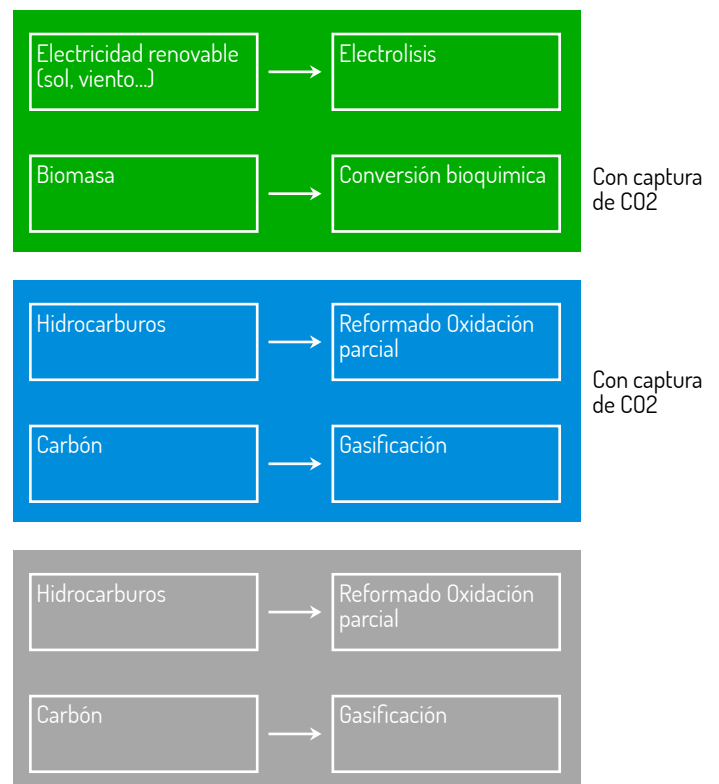


Figura 02 » Principales tecnologías de producción de hidrógeno clasificadas en función del tipo de hidrógeno que generan (Fuente: elaboración propia)

do elevados e inaceptables para la mayoría de las aplicaciones energéticas. Por lo tanto, el desarrollo de una economía basada en el hidrógeno exige una reducción de dichos costes. Sin embargo, la bajada continuada de los precios de producción de las energías eólica y solar, así como el de los electrolizadores (los equipos necesarios para producir la electrolisis del agua), auguran un futuro esperanzador para

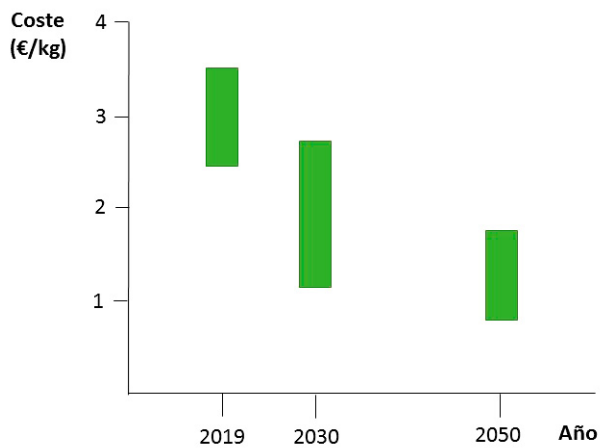
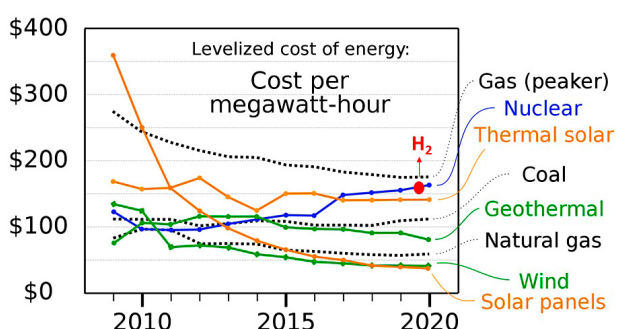


Figura 03 » Estimación de los costes futuros de la producción de hidrógeno verde (Fuente: elaboración propia)

la producción de hidrógeno verde, tal y como se muestra en la figura 03. Según los cálculos de la Agencia Internacional de la Energía, en España se podrá producir hidrógeno a un coste de entre 1,5 y 2,4€ por kilogramo antes de 2050, lo que transformaría al hidrógeno en un vector energético altamente competitivo (Bloomberg, 2020).

En la figura 04, se muestra la evolución temporal del coste nivelado de la energía (coste de convertir una fuente de energía en electricidad), para distintas fuentes de energía (Raikar, 2020). Hoy en día, el precio de la electricidad producida mediante hidrógeno verde, se sitúa en torno a 163,57 \$/MWh (se ha indicado con un círculo rojo en la gráfica de la figura 04). Se trata de un valor muy elevado todavía, para poder competir con otras fuentes de energía, tales como el gas natural, o las energías solar y eólica.

Figura 04 » Evolución temporal del coste nivelado de la energía para distintas fuentes de energía. El valor del coste actual del hidrógeno se muestra como un círculo rojo en la zona derecha de la gráfica (Fuente: RCraig09 bajo CC BY-SA 4.0)



3 » Almacenamiento

Tal y como se observa en la primera fila de la tabla 01, el hidrógeno tiene un alto contenido de energía por unidad de masa, muy superior al de los combustibles habituales. Sin embargo, su energía por unidad de volumen es menor (fila 2 de la tabla 1), lo que supone un problema para aquellas aplicaciones en las cuales el volumen ocupado por el combustible es un factor crítico, tales como las aplicaciones de transporte. Por lo tanto, el reto tecnológico que hay que superar si se quieren alcanzar los objetivos futuros de una economía basada en el hidrógeno, es lograr una forma de almacenarlo que sea eficiente, segura y compacta (Prabukhot, 2020), es decir, requiere el desarrollo de sistemas de compresión o licuefacción para aumentar su densidad y disminuir su volumen.

A continuación, se describen los principales métodos de almacenamiento existentes en la actualidad:

3.1 » Estado gas

El hidrógeno se puede almacenar en estado gaseoso en depósitos de alta presión (200, 350 y 700 bares). Los tanques de almacenamiento se fabrican en materiales compuestos capaces de soportar las elevadas presiones a las que se encuentra el hidrógeno, así como de impedir su difusión hacia el exterior, ya que, debido al pequeño tamaño de su molécula, es capaz de permear a través de muchos materiales (Andersson, 2019).

3.2 » Estado líquido

La segunda opción de almacenamiento consiste en licuar el hidrógeno manteniéndolo a una temperatura de -253°C en unos depósitos llamados criostatos. Se trata de un método de almacenamiento costoso y que puede conllevar pérdidas si el aislamiento térmico de los tanques no es adecuado (Valenti, 2016).

3.3 » Estado sólido

El tercer método de almacenamiento se basa en la capacidad que tienen ciertos materiales sólidos (hidruros metálicos, nanotubos de carbono, compuestos organometálicos...) de albergar hidrógeno dentro de su estructura. Se trata de un método en vías de desarrollo y para que pueda utilizarse a nivel comercial, será necesario incrementar la capacidad de absorción de dichos materiales, ya que, en la actualidad, el porcentaje de hidrógeno que queda retenido en el interior de los mismos es muy pequeño y se desconocen los mecanismos de absorción y posterior liberación del hidrógeno (Varin, 2009).

En la figura 05 se resumen de forma gráfica los distintos métodos de almacenamiento descritos en los párrafos anteriores.

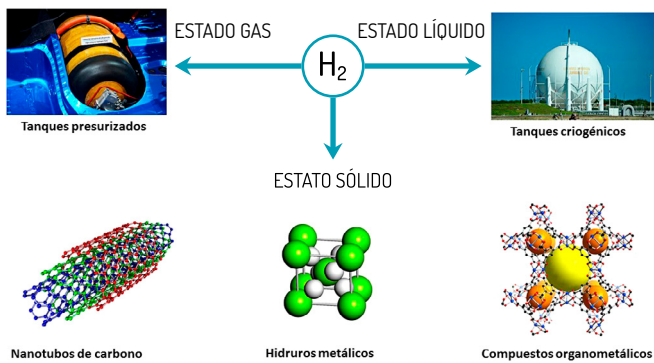


Figura 05 » Métodos de almacenamiento de hidrógeno (Fuente: elaboración propia y Pixabay. Tanque criogénico: Heather Paul bajo CC BY-ND 2.0, tanque presurizado: agautsc on Foter.com bajo CC BY-NC 2.0., Nanotubo de carbono: Eric Wieser bajo CC BY-SA 3.0, Compuesto organometálico: Tony Boehle bajo CC BY-SA 3.0)

4 » Transporte

El hidrógeno se puede transportar por vía marítima o terrestre en estado gaseoso y en estado líquido. El método más económico dependerá de la cantidad transportada y de la distancia a recorrer. La licuefacción del hidrógeno es interesante cuando los volúmenes necesarios son pequeños. En estado líquido se transporta por mar o, en caso de la vía terrestre, por medio de camiones cisterna y trenes. En estado gaseoso se transporta principalmente por vía terrestre y, en este caso, los medios más utilizados son los camiones cisterna y los gaseoductos. La utilización de la red existente de gaseoductos de gas natural es una opción que permite reducir los gastos en nuevas infraestructuras. La iniciativa **European Hydrogen Backbone** (EHB) ha propuesto un plan de desarrollo de una red específica de transporte de hidrógeno en toda Europa, que recorrerá 39.700 km y conectará 21 países en 2040. El 69% de dicha red estará compuesta por gaseoductos de gas natural adaptados y el 31% restante, por gaseoductos de nueva construcción (EHB, 2021).

APLICACIONES DEL HIDRÓGENO: PILAS DE COMBUSTIBLE

Para poder extraer la energía contenida en la molécula de hidrógeno se utilizan unos dispositivos, las llamadas **pilas de combustible**, que transforman la energía química almacenada en el hidrógeno en energía eléctrica. Los componentes principales de una pila de combustible se muestran de modo esquemático en la **figura 06**: los **electrodos** (ánodo y cátodo), que son las zonas de la pila por las que se introducen el combustible (hidrógeno) y el oxidante (oxígeno), y el **electrolito**. El ánodo está alimentado por hidrógeno, que reacciona con el oxígeno que llega al cátodo, cediéndole sus electrones y dando lugar a la formación de agua. Los electrones, es decir, la corriente eléctrica generada por la pila, circulan entre los electrodos a través de un circuito externo y se pueden utilizar para alimentar una gran va-

riedad de dispositivos eléctricos. El electrolito permite el intercambio de sustancias químicas necesarias para que se produzca la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno. Existen diversos tipos de pilas de combustible, que se clasifican en función del material que forma el electrolito y de su temperatura de funcionamiento (DOE, 2021).

Algunos ejemplos de aplicación de las pilas de combustible existentes en la actualidad se muestran en la **figura 07**, y abarcan desde pequeños dispositivos móviles tales como teléfonos u ordenadores portátiles, hasta grandes instalaciones industriales (Johnsson, 2019; Manoharan, 2019; Cigolotti 2021). En el sector del transporte, los grandes beneficiados en la actualidad son los vehículos particulares, pero ya existen trenes, autobuses y barcos alimentados

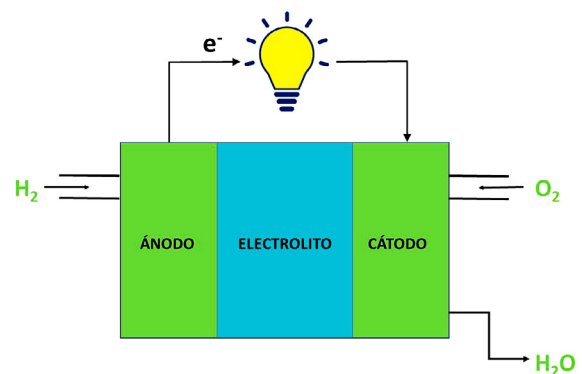


Figura 06 » Esquema de una pila de combustible (Fuente: propia)

por pilas de combustible. Otros sectores beneficiados son el militar y el espacial. Los Estados Unidos y Alemania han desarrollado una gran actividad para lograr la implementación de sistemas de pila de combustible para generación militar portátil, de transporte y en áreas remotas (Zhou, 2021). Por su parte, la NASA ha utilizado pilas de combustible en sus misiones espaciales desde los años 60. El robot Perseverance, en misión en Marte actualmente, lleva incorporado un instrumento equipado con pila de combustible, que intentará producir oxígeno a partir de CO₂ como parte de su programa de investigación (NASA, 2021). En el sector estacionario, las pilas de combustible pueden ser instaladas tanto en viviendas particulares como en grandes complejos industriales. La elevada portabilidad del hidrógeno lo convierte en el combustible ideal para satisfacer las necesidades energéticas de instalaciones alejadas de las grandes redes de distribución de energía (Felseghi, 2019).

Figura 07 » Aplicaciones actuales de las pilas de combustible (Fuente: Pixabay y elaboración propia)



CONCLUSIONES

Debido a sus propiedades excepcionales, el hidrógeno renovable está llamado a jugar un papel clave en la sustitución de los combustibles fósiles y el proceso de descarbonización del sector energético. Es un gas abundante en el universo, tiene un elevado contenido energético por unidad de masa, y su reacción con el oxígeno para liberar su energía, sólo genera agua. Sin embargo, al tratarse de un vector energético y no de una fuente de energía primaria, para poder utilizar la energía contenida en el hidrógeno es necesario producirlo, almacenarlo, transportarlo y someterlo a los procesos adecuados para extraerla. Aunque en los últimos años se han hecho enormes progresos, todavía

existen muchos problemas asociados al ciclo del hidrógeno que hay que resolver, sobre todo en las etapas de producción y almacenamiento, para conseguir su total integración en el sistema energético actual. Los costes de producción también deben disminuir si se quiere lograr que el hidrógeno sea competitivo con otras fuentes de energía utilizadas en la actualidad. Los retos son numerosos, pero como decía el escritor estadounidense Napoleon Hill: “Cualquier cosa que la mente del hombre puede concebir y crear, puede ser conseguida”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson, J., Grönkvist, S. *Large-scale storage of hydrogen*. Int. J. Hydrogen Energ. 44(23), 11901, (2019)
- Bloomberg: *A Three-Part Series on Hydrogen Energy*. 2020. <https://www.bloomberg.com/graphics/20-20-opinion-hydrogen-green-energy-revolution-challenges-risks-advantages/oil.html> (último acceso, septiembre 2021).
- Caetano, N.S., Mata, T.M., Martins, A.A., Felgueiras, M.C. *New Trends in Energy Production and Utilization*. Energy Procedia 2, 107, 7, (2017)
- Cigolotti V., Genovese, M., Fragiaco, P. *Comprehensive Review on Fuel Cell Technology for Stationary Applications as Sustainable and Efficient Poly-Generation Energy Systems*. Energy, 14, 4963, (2021)
- DOE, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells> (último acceso 17 de septiembre de 2021).
- EHB, https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone (último acceso: 15 de septiembre de 2021).
- Johnsson, R. A., Carcadea, A., Raboaca M. S., Trufin, C. N., Filote, C. *Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications*. Energies 12(23), 4593, (2019)
- Johnsson, F., Kjærstad, J., Rootzén, J. *The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels*. Clim. Policy, 19, 1, (2018)
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, A., Senior, B. T. F., Ashuri, T., Krohn, J. *Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect*. Appl. Sci. 9(11), 2296, (2019)
- Midilli, A., Ay, Mo., Dincer, I., Rosen, M. *On hydrogen and hydrogen energy strategies I: Current status and needs*. Renew. Sustain. Energy Rev. 9, 255, (2005)
- NASA, <https://mars.nasa.gov/mars2020/> (último acceso: 28 de septiembre de 2021)
- Nooussan, M., Raimondi, P. P., Scita R., Hafner, M. *The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective*. Sustainability, 13(1), 1, (2020)
- Prabhukhot, P. R., Wagh, M. M., Gangal, A. *C.A review on solid-state hydrogen storage material*. Adv. Energy Power, 4(2), 11, (2016)
- Raikar, S., Adamson, R. *Renewable Energy Finance*. Theory and Practice, Academic Press (2020)
- Ren, J., Musyoka, N. M., Langmi, H.W., Mathe, M., Liao, S. *Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review*. Int. J. Hydrog. Energy 42, 289, (2017)
- Smil, V. *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. & BP Statistical Review of World Energy (2017)
- Valenti, G. *Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage*. *Compendium of Hydrogen Energy*. In Woodhead Publishing Series in Energy. Editor(s): Ram B. Gupta, Angelo Basile, T. Nejat Veziroğlu, (2016)
- Varin, R. A., S., Czujko, T., Wronski, Z. S. *Nanomaterials for Solid State Hydrogen Storage*. Springer Science & Business Media, (2009)
- Zhou, Y., Cheng, J., Su, Y., Xu, W., Li, H., Xu, L. *Development of Hydrogen Fuel Cell Technology and Prospect for Its Military Application*. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. CSPA 2020: Communications, Signal Processing, and System, 1722 (2021).

BIOGRAFÍA

Isabel Lado Touriño es Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad de Santiago de Compostela. Es profesora titular de la Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño de la Universidad Europea de Madrid, en donde trabaja desde 2001 y colaboradora del Instituto de Investigaciones Biomédicas “Alberto Sols” (CSIC) desde 2011. De 1998 a 2001 fue profesora titular del Instituto Superior de Materiales de Le Mans (Francia). Es autora de más de una treintena de publicaciones científicas en el campo de la simulación molecular de nanomateriales.

