

Tecnologías del Hidrógeno

Hydrogen Technologies

Antonio Chica¹, Asunción Fernández², José Ramón Fernández³, Gemma Grasa⁴, Miguel Angel Laguna-Bercero⁵, María Jesús Lázaro⁴, Isabel Martínez⁴, Miguel Antonio Peña⁶, José Luis Pinilla⁴, David Sebastián⁴, José Manuel Serra¹, María Serra⁷, Isabel Suelves⁴, Luis Valiño⁸

¹Instituto de Tecnología Química, ITQ, CSIC-Universitat Politècnica de València, Avd. de Los Naranjos s/n, 46022 Valencia

²Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, ICMS, CSIC-Universidad de Sevilla, Avda. Américo Vespucio 49, 41092 Sevilla

³Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR, CSIC, C/ Francisco Pintado Fe 26, 33011 Oviedo

⁴Instituto de Carboquímica, ICB, CSIC, C/ Miguel Luesma Castán 4, 50018 Zaragoza

⁵Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza, C/ María de Luna 3, 50018 Zaragoza

⁶Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, ICP, CSIC. C/ Marie Curie 2, 28049 Madrid

⁷Instituto de Robótica e Informática Industrial, IRI, CSIC-Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Llorens i Artigas 4-6, 08028 Barcelona

⁸Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión, LIFTEC, CSIC-Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna 10, 50018 Zaragoza

*Corresponding author: achica@itq.upv.es



Abstract

The interest in hydrogen technologies has grown in recent years, mainly because an economy based on hydrogen can help to solve important challenges related to the global economy of the future: energy security and climate change. Taking advantage of this momentum, more and more countries are implementing a growing number of policies related to hydrogen. Indeed, the European Hydrogen Strategy establishes hydrogen as essential drivers for the total decarbonization of the current energy system in order to achieve the EU's commitment related to carbon neutrality by 2050. However, the successful development of the hydrogen technologies requires the collaboration of the public and private sectors to accelerate its deployment and make more competitive its implementation at large-scale. The research groups that take part of the line of work dedicated to hydrogen technologies, within the CSIC Interdisciplinary Thematic Platform PTI Mobility 2030, work in this regard, developing their investigations in several important areas related to the hydrogen technologies such as hydrogen generation, storage, distribution and uses.

Resumen

El interés por las tecnologías del hidrógeno ha crecido en los últimos años, principalmente porque una economía basada en el hidrógeno puede dar respuesta a los grandes desafíos de la economía global del futuro: seguridad energética y cambio climático. Aprovechando este impulso, cada vez son más los países que están implementando un número creciente de políticas en favor del hidrógeno. Prueba de ello es la Estrategia Europea del Hidrógeno que establece al hidrógeno como un elemento esencial en la descarbonización total del actual sistema energético para alcanzar el compromiso de la UE

con la neutralidad de carbono en 2050. No obstante, el desarrollo exitoso de las tecnologías del hidrógeno requiere que todos los actores, incluidos los sectores público y privado, aumenten sus esfuerzos para acelerar su despliegue y hacer que su implantación a gran escala resulte competitiva. Los grupos de investigación que forman parte del área de trabajo de tecnologías del hidrógeno, dentro de la Plataforma Temática Interdisciplinaria PTI Mobility 2030 del CSIC, trabajan en este sentido, desarrollando su labor en áreas tan diversas como la generación, el almacenamiento, la distribución y los usos del hidrógeno.

1. Introducción

En los últimos meses la política europea ha centrado una buena parte de su agenda en el debate sobre un camino de descarbonización ambicioso hasta 2050. En este sentido, en diciembre de 2019, la Comisión presidida por Ursula G. von der Leyen puso sobre la mesa su proyecto de «Pacto Verde», con el objetivo de consensuar una estrategia global de crecimiento sostenible que permita alcanzar la neutralidad en carbono en 2050 y conseguir una importante reducción de las emisiones en 2030 [1]. La idea es alinear dicha neutralidad en carbono con los objetivos pactados en el Acuerdo de París, que buscan mantener el calentamiento global por debajo 1,5°C [2]. La drástica reducción de las emisiones de CO₂ requiere el impulso e implementación de tecnologías limpias, sostenibles y eficientes que permitan descarbonizar sectores económicos intensivos en emisiones como el transporte, la industria o el sector residencial. En este sentido, el hidrógeno, como portador de energía, supone una solución limpia y almacenable capaz de dar respuesta a estas necesidades de descarbonización. Es por ello que en los últimos años el hidrógeno ha

ganado importancia en la agenda política nacional e internacional. En España, la Hoja de Ruta del Hidrógeno recientemente publicada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) [3] establece unos ambiciosos objetivos para 2030, con los que se pretende conseguir la descarbonización de una buena parte del hidrógeno consumido, así como su plena introducción en la movilidad sostenible, Figura 1.

Aunque las tecnologías de hidrógeno representan una alternativa prometedora, resulta necesario superar importantes obstáculos que permitan su despliegue masivo como los altos costes de las pilas de combustible, el desarrollo de procesos eficientes y de bajo coste para producir hidrógeno sin huella de carbono (hidrógeno verde) y el desarrollo de una red amplia y segura para el almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno. En este sentido, los grupos de investigación que forman parte del área trabajo dedicada a las tecnologías del hidrógeno dentro de la PTI Mobility 2030 del CSIC, pretenden contribuir al desarrollo y despliegue de estas tecnologías

mediante la ejecución de proyectos de demostración e investigación fundamental y aplicada en temas tan importantes como la generación, almacenamiento, distribución y usos del hidrógeno. La estrecha cooperación entre los grupos de la plataforma, junto al fomento, dentro de misma, de proyectos de colaboración con otras partes interesadas como la industria del petróleo y el gas, los proveedores de redes eléctricas, los fabricantes de automóviles, los centros tecnológicos, las universidades y las autoridades locales, regionales y nacionales, será decisiva para alcanzar con éxito los objetivos futuros de electrificación del transporte y movilidad sostenible. El objetivo de este artículo es presentar los avances y desarrollos más relevantes de grupos que integran esta área de trabajo dentro de la PTI Mobility 2030 del CSIC, así como sus capacidades y disponibilidad para seguir trabajando y colaborando con todos aquellos sectores interesados en el desarrollo e implantación de las prometedoras tecnologías del hidrógeno.

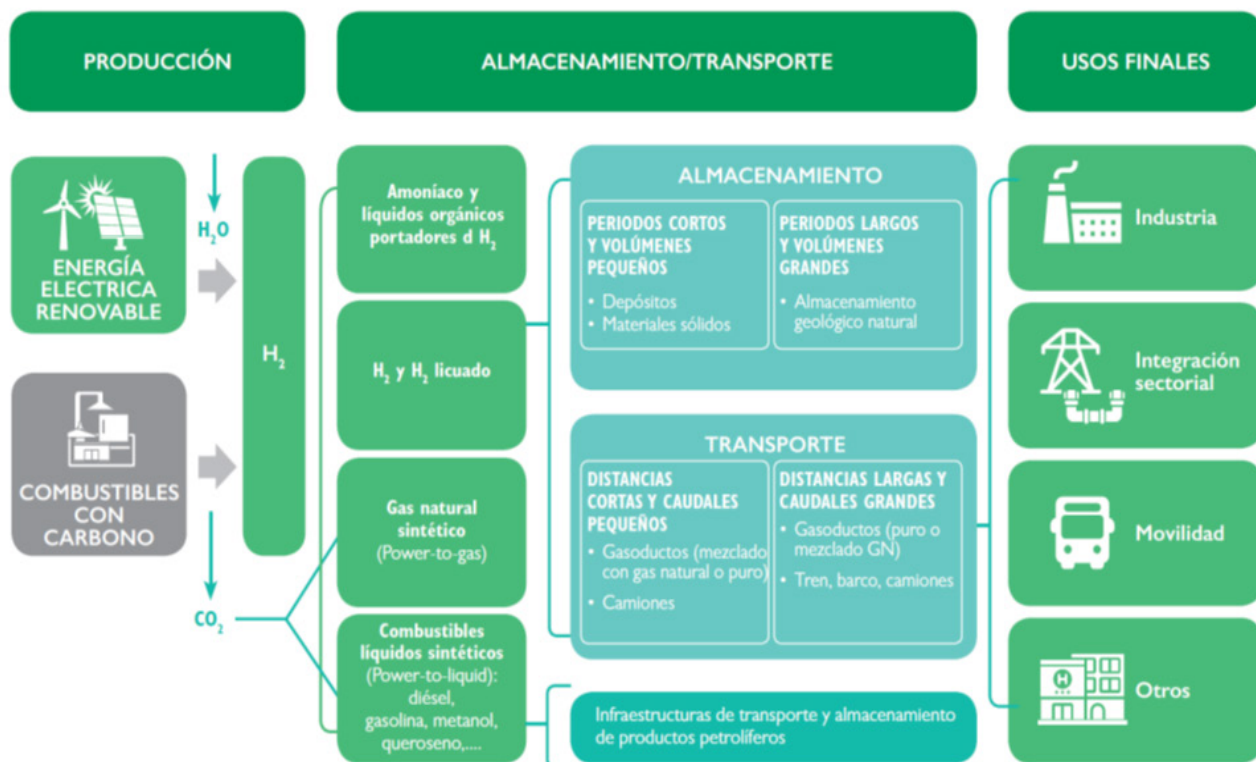


Figura 1. Cadena de valor del hidrógeno donde se identifican diferentes etapas relacionadas con su producción, almacenamiento, transporte y usos. Tomado de la Hoja de Ruta del Hidrógeno publicada por el MITECO [3].

Figure 1. Hydrogen value chain where different stages related to its production, storage, transport and uses are identified. Taken from the Hydrogen Road Map published by MITECO [3].

2. Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno puede realizarse a partir de gas natural u otros hidrocarburos fósiles, con emisión de CO₂ (hidrógeno gris), sin emisiones de CO₂ (hidrógeno turquesa) o con captura de CO₂ (hidrógeno azul); o a partir de biomasa, biogás u otros residuos orgánicos, y por descomposición del agua a partir de fuentes de energía renovables (hidrógeno verde).

2.1. Producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles

En la PTI Mobility 2030 existen diversos grupos que proponen alternativas sostenibles para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Así, el grupo de Conversión de Combustibles del Instituto de Carboquímica (ICB) [4], investiga un proceso de descomposición catalítica de hidrocarburos ricos en metano, que se puede aplicar a gases licuados del petróleo (propano y butano) o a hidrocarburos

residuales. En este proceso no se genera CO_2 , por lo que el hidrógeno obtenido se denomina hidrógeno turquesa. Además de H_2 , en este proceso se producen materiales de carbono nanoestructurados cuya estructura dependerá del tipo de catalizador utilizado: nanofibras de tipo fishbone (Ni) y nanotubos de carbono (Fe). El escalado de esta tecnología también ha sido abordado en los proyectos CENIT-SPHERA y ENE2011-28318-C03-01, utilizando instalaciones semipiloto de lecho rotatorio y fluidizado en modo continuo [5]. Los últimos estudios se centraron en la utilización de biogás como fuente de metano y en las aplicaciones para el material carbonoso (ENE2014-52189-C2-1-R y ENE2017-83854-R).

Otra de las tecnologías de producción de hidrógeno sin huella de carbono abordadas por el grupo de Investigaciones Medioambientales, también en el ICB, y el grupo de Captura de CO_2 del Instituto de Ciencia y Tecnologías del Carbón (INCAR) [7], es el proceso Ca/Cu [8]. Dicho proceso combina el reformado de metano y absorción de CO_2 con CaO en presencia de un catalizador de reformado con un ciclo redox CuO/Cu que suministra la energía necesaria para regenerar el sorbente a la vez que se produce una corriente concentrada de CO_2 . El proceso consta de tres etapas de reacción en un sistema de lechos fijos a presión, y tiene como principales productos una corriente de H_2 de hasta 95 % vol. de pureza, una corriente de N_2 prácticamente pura, y la posibilidad de exportar electricidad y vapor. Este proceso se validó a escala TRL4-5 (EU-FP7 ASCENT GA N°608512), estimándose unos costes de producción de H_2 (con eficacias de captura de $\text{CO}_2 > 95\%$) entre un 7-9% inferiores a los de un proceso de reformado con vapor de agua con captura de CO_2 mediante metildietanolamina (MDEA) [9]. En la actualidad, el proyecto EU-H2020 C4U GA N° 884418 [10] desarrolla una variante del proceso (CASOH) que permitirá convertir el 99 % del CO presente en una corriente de gas de un alto horno (BFG), en una corriente de H_2/N_2 susceptible de ser integrada en la acería, y en una corriente concentrada de CO_2 . El grupo de Captura de CO_2 de INCAR, con participación del grupo de Investigaciones Medioambientales del ICB, lidera la construcción de una planta a escala TRL7 integrada en la factoría de Arcelor Mittal en Avilés, y pretende demostrar el bajo SPECCA (del inglés Specific Primary Energy Consumption for CO_2) del proceso y contribuir al objetivo del proyecto C4U de eliminar el 89 % del CO_2 producido en la acería.

La producción de hidrógeno a partir de gas natural por métodos alternativos a los tradicionales también está siendo abordada por el grupo de Conversión y Almacenamiento de Energía del Instituto de Tecnología Química (ITQ) [11] y el grupo de Energía y Química Sostenible del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP) [12]. Concretamente, estos grupos han centrado parte de sus estudios en el reformado autotérmico de gas natural. La principal ventaja que presenta este proceso es que el calor necesario para llevar a cabo la reacción de

reformado es suministrado por la oxidación directa de una parte del metano alimentado. De esta forma, la demanda energética del proceso disminuye considerablemente, llevando a un ahorro económico importante. No obstante, los catalizadores utilizados en este proceso todavía están en fase de desarrollo, ya que las condiciones de operación suponen un serio inconveniente para su estabilidad debido a problemas de sinterización y generación de coque. Los estudios realizados por el grupo del ITQ (proyectos PROVIP-RTC-2014-2239-2 y ENE2011-24761), han permitido el desarrollo de diferentes formulaciones catalíticas, basadas en hidrotalcitas y sepiolitas, de alta actividad y resistencia a la sinterización y deposición de coque. En cuanto al grupo del ICP lleva casi 30 años investigando en catalizadores para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles [13], realizando numerosos estudios sobre la relación entre la actividad y la estructura de catalizadores basados en níquel y óxidos tipo perovskitas de metales de transición, tanto para oxidación parcial de metano como para el reformado autotérmico. Igualmente, catalizadores preparados a partir de hidrotalcitas han sido estudiados para la producción de hidrógeno por descomposición de metano. Se han estudiado también los catalizadores necesarios para los procesos de purificación de hidrógeno procedente de fuentes fósiles.

2.2. Producción de hidrógeno a partir de biomasa u otros residuos orgánicos

Uno de los procesos más utilizados para la producción de hidrógeno renovable, también llamado hidrógeno verde, es la gasificación de biomasa. El grupo de Investigaciones Medioambientales del ICB ha abordado el estudio de procesos de Gasificación Mejorada de Biomasa (o Sorption Enhanced Gasification, SEG) con el objetivo de reducir la complejidad y el coste de producción del hidrógeno renovable [14]. Este proceso emplea vapor como agente gasificante y la circulación interna de CaO en sistemas de lechos fluidizados dobles aporta el calor necesario para llevar a cabo la reacción gasificación. Dicho proceso, permite la obtención de una corriente a la salida del gasificador con un ratio H_2/CO modulable. El concepto SEG se ha demostrado a escala TRL5 (EU-H2020 Fledged GA No. 727600) [15] para distintas biomásas residuales y la fracción orgánica de un residuo sólido urbano. En este caso, el gas de síntesis producido, ha sido la corriente de entrada para un proceso intensificado de producción de Dimetil Éter (DME) en el que ha participado el grupo de Energía y Química Sostenible del Instituto de Catálisis y Petróleo Química (ICP). En línea también con la producción de un gas de síntesis de alta relación H_2/CO , se está trabajando en el reformado de glicerol, un residuo de biorefinerías, dentro del proyecto EU-H2020 GLAMOUR GA No. 884197, que ha comenzado recientemente [16].

La producción de hidrógeno mediante la gasificación de biomasa también ha sido abordada por el grupo de Conversión y Almacenamiento de Energía del

ITQ. La producción de hidrógeno vía gasificación de biomasa presenta importantes problemas como la generación de alquitranes (en inglés Topping Atmospheric Residue-TARs). La presencia de estos compuestos provoca importantes pérdidas en rendimiento, además de daños en los depósitos y atascos en las instalaciones que deterioran de los equipos, siendo necesaria, por tanto, su eliminación. Estudios realizados dentro del proyecto BioH2 (IPT-2012-0365-120000) [17] permitieron desarrollar formulaciones catalíticas basadas en minerales naturales como soportes (dolomita, olivino y sepiolita) que evitaron la producción de TARs. Estudios realizados también en el proyecto BioH2 demostraron que el pretratamiento de diferentes biomásas (tabaco, cáscara de almendra y orujillo de aceituna) por carbonización hidrotermal (HTC) permitía obtener un producto carbonoso que mejora significativamente el rendimiento a hidrógeno tras su gasificación.

El reformado con vapor de agua de compuestos derivados de la biomasa como bioetanol, glicerina y furfural también ha sido investigado por este grupo [11]. Cabe destacar los excelentes resultados obtenidos en la producción de hidrógeno verde mediante el reformado de bioetanol. Resultados que han sido protegidos bajo una patente [18] y que actualmente se encuentran en fase de escalado dentro del proyecto europeo Life-ECOELECTRICITY [19]. En dicho proyecto se ha diseñado y construido una planta piloto en la que se llevará a cabo el reformado catalítico de un residuo alcohólico generado en una destilería vínica (fracciones alcohólicas impuras, purgas). En esta misma línea, el grupo del ITQ también ha participado en el proyecto europeo GREENZO, donde se ha desarrollado a nivel pre-industrial una planta piloto que permite la obtención de óxido de zinc a partir de un residuo metálico no ferroso como el zamak, el cual ha sido posteriormente validado como soporte de catalizadores de reformado de bioetanol. La novedad del proceso radica en que tanto el soporte catalítico como la producción de hidrógeno son de naturaleza renovable. Este grupo también ha trabajado en el reformado catalítico de glicerina. Concretamente en los proyectos CENIT-SPHERA (en colaboración con Repsol) y BIOTABACUM (IPT-2012-0060-120000), donde desarrollaron catalizadores para procesos de reformado en fase acuosa (APR) y reformado con vapor de agua, respectivamente. Finalmente, los trabajos más recientes del grupo se han centrado en el reformado seco de biogás, donde han desarrollado formulaciones catalíticas dopadas con Ce de alta actividad y estabilidad frente a la sinterización y disposición de coque [20].

La producción de hidrógeno a partir de la biomasa y fuentes renovables es también una de las líneas principales del grupo de Energía y Química Sostenibles del ICP [12]. El etanol es el producto de partida más estudiado, especialmente en catalizadores basados en níquel o metales nobles con promotores de tipo básico y redox, así como

glicerol, otros derivados carbonosos de la biomasa (TAR) y moléculas oxigenadas modelo.

2.3. Producción de hidrógeno por descomposición del agua

La Hoja de Ruta del Hidrógeno [3] española se focaliza principalmente en el hidrógeno verde producido por descomposición del agua. Este proceso se puede llevar a cabo mediante electrolisis usando electricidad de origen renovable, a partir de energía solar térmica, y mediante la ruptura directa por fotólisis con luz solar.

La tecnología más madura es la de electrolisis de baja temperatura (<200°C), en la que se incluyen las celdas de intercambio de protones (PEMEC) y la electrolisis alcalina (AEC). El grupo de Conversión de Combustibles del ICB [21,22] y el grupo de Energía y Química Sostenibles del ICP [12,23] trabajan en el desarrollo de electrocatalizadores para esta tecnología. En el caso de las PEMEC, el objetivo disminuir, o incluso eliminar, la cantidad de el platino y el iridio que actualmente se usa. De esta forma, se han incorporado materiales grafénicos en nanoestructuras compuestas por metales no nobles y metales de los grupos 4 y 5 de la tabla periódica para la mejora de la durabilidad. La corrosión de los soportes carbonosos se ha minimizado usando materiales como nanofibras, xerogeles o carbones mesoporosos ordenados. Se han obtenido catalizadores de Ru con gran estabilidad cuanto este se incorpora en una estructura tipo perovskita o usando electrocatalizadores basados en Ni con estructuras cristalinas similares. En el proyecto SPHERA, en colaboración con Acciona y Ingeteam, se desarrollaron catalizadores basados en níquel para electrocatalizadores alcalinos. En la actualidad la investigación en electrolizadores de baja temperatura se lleva cabo en el marco de los proyectos de investigación, ENE2017-83976-C2-1-R del Plan Nacional, y en el ITN-BIKE y PROMET-H2 del programa H2020 de la Unión Europea.

La electrolisis de alta temperatura (>700°C) mediante celdas de óxidos sólidos (SOEC) [24] no tiene aún recorrido comercial, pero su alta eficiencia las hace muy prometedoras. El grupo ProCaCef del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA) [25], dentro del proyecto GFORCE (RTI2018-098944-J-I00), está desarrollando nuevos materiales para fabricar celdas SOEC que permitan la coelectrólisis de CO₂ y H₂O [26], usando una geometría microtubular y catalizadores avanzados de óxidos metálicos de Ce, Pr y Mn. Dentro del proyecto 3DPASSION (PID2019-107106RB-C32) se está utilizando el mecanizado láser con el objetivo de reducir la temperatura de operación de los electrolizadores. Además, se están desarrollando nuevos sistemas eutécticos como electrolitos y nuevos electrodos de oxígeno basados en estructura de tipo níquelato. Por su parte, el grupo de Conversión y Almacenamiento de Energía del ITQ trabaja en los procesos que gobiernan la hidratación y funcionamiento de los materiales y

componentes de los electrolizadores (proyectos M-era.NET como GoPHy MICO y FunKey Cat), y en el desarrollo de electrolizadores tubulares de vapor a temperatura intermedia para la producción de hidrógeno presurizado (proyectos H2020 como GAMER y WINNER) [11, 27].

Los grupos de Pilas de Combustible del Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) [28] y de Control Automático del Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRI) [29] han trabajado en la construcción de electrolizadores y de diagnóstico y modelado de los mismos, así como el diseño de sistemas de control que permiten optimizar su eficiencia y durabilidad.

La ruptura térmica directa del agua requiere de una temperatura superior a los 4000°C, lo que no es posible técnicamente. Es posible realizarla a temperaturas más bajas (<1000°C) mediante ciclos termodinámicos, una serie de reacciones químicas que se producen en un ciclo cerrado. Diferentes sistemas basados en ferritas han sido desarrollados para este proceso por el grupo de Energía y Química Sostenibles del ICP [12]. Para la ruptura del agua con luz solar directa es necesario un catalizador con un gap de energía entre la banda de conducción y la de valencia que sea apropiado para la adsorción de luz solar y la transferencia de electrones a los protones del agua. El grupo de Energía y Química Sostenibles del ICP investiga en catalizadores basados en CdS con diferentes morfologías (nanobarras, láminas, microesferas) preparados por síntesis sorvotermal y dopados con grafeno y metales de transición.

3. Almacenamiento y distribución del hidrógeno

El hidrógeno puro tiene el valor más alto de energía por unidad de masa de todos los combustibles químicos, 33,33 kWh/kg, pero dada su baja densidad a presión atmosférica, su capacidad volumétrica de almacenamiento energético es muy baja. Incluso a 150 bar es únicamente de 0,449 kWh/l comparados con los 8,8 kWh/l de la gasolina. Encontrar sistemas de almacenamiento de hidrógeno que incrementen sustancialmente estos valores es por tanto imprescindible para hacer viable la aplicación de este gas como vector energético. Por otra parte, en la aplicación final, la relación coste-eficiencia y los aspectos de seguridad van a condicionar el desarrollo de las tecnologías más adecuadas. Los principales métodos de almacenamiento de H₂ incluyen la compresión/licuefacción, la adsorción o el almacenamiento en forma química y necesitan analizarse en el contexto, tanto del propio transporte y distribución de H₂ a gran escala, como para el uso del hidrógeno en aplicaciones estacionarias, portátiles y de automoción y transporte. Los grupos integrados en la PTI Mobility 2030 del CSIC cubren aspectos fundamentales del desarrollo de materiales y procesos para el almacenamiento del hidrógeno comprimido y en forma química, la automatización y la integración de sistemas de producción, almacenamiento y suministro de H₂ en sistemas

aislados con generación eléctrica renovable.

3.1. Almacenamiento

El almacenamiento sólido-gas reversible en hidruros metálicos se caracteriza por una buena capacidad volumétrica siendo de especial interés en aplicaciones estacionarias. Durante el proyecto europeo COSY el grupo NanoMatMicro del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMS) [30] ha estudiado el almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos ligeros (MgH₂) e hidruros complejos (LiBH₄) combinados en el concepto de "composites de hidruros reactivos". Se desarrollaron sistemas reversibles siendo la aportación fundamental del grupo comprender el papel de los aditivos/catalizadores en la mejora de las cinéticas de carga y descarga; un aspecto fundamental en el desarrollo de tanques de almacenamiento basados en hidruros. El Grupo de Control del IRI ha realizado a su vez diferentes trabajos sobre el modelado de los procesos de absorción y desorción en bombonas de hidruros metálicos [31]. A partir de estos modelos, en estos momentos se está trabajando en el diseño de estimadores de la cantidad de hidrógeno restante en sistemas de hidruros metálicos. Este tipo de almacenaje, junto con las botellas de hidrógeno gas comprimido, están siendo analizados para las diferentes aplicaciones móviles dentro del proyecto DOVELAR.

Durante la ejecución de dos proyectos nacionales el grupo NanoMatMicro del ICMS ha investigado también las reacciones de hidrólisis catalítica de hidruros complejos como el borohidruro sódico (NaBH₄) o el borano de amoníaco (NH₃BH₃). La aportación fundamental ha sido el desarrollo de catalizadores y dispositivos para la liberación controlada de hidrógeno a partir de soluciones de estos hidruros, que funcionan así como portadores líquidos de hidrógeno [32]. Los dispositivos desarrollados permiten alimentar a demanda una pila de combustible en aplicaciones portátiles. De especial relevancia en este trabajo es el desarrollo de recubrimientos y películas delgadas catalíticas sobre sustratos porosos por técnicas asistidas por plasma.

3.2. Integración y distribución

El Grupo de Pilas de Combustible del LIFTEC [33] ha desarrollado y protegido industrialmente un sistema modular de producción y almacenamiento y suministro de hidrógeno para aplicaciones prácticas en sistemas aislados, con generación fotovoltaica [34]. El sistema está compuesto por un sistema compacto de purificación de agua, un electrolizador alcalino, un compresor de diafragma metálico y un sistema seguro de almacenamiento y suministro de H₂, de diseño propio. Este dispositivo puede almacenar 106 m³ (9,53 kg) de hidrógeno a 200 bar. Al ser un sistema modular, estos números muestran únicamente un ejemplo de aplicación práctica. El H₂ almacenado en este sistema se suministra a un

vehículo de hidrógeno mediante la adaptación de un sistema comercial de repostaje seguro WEH®. Se ha diseñado un panel de conexión con su correspondiente electrónica de control, tanto para el llenado del sistema de almacenamiento como para el suministro al vehículo [35].

En cuanto al transporte y distribución para largas distancias, los líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHCs), junto con el amoniaco, presentan ventajas por su adecuada combinación de capacidades volumétricas y gravimétricas de almacenamiento. Actualmente el grupo NanoMatMicro del ICMS [30] trabaja en el uso de LOHCs dentro del proyecto nacional RTI2018-093871-B-I00. Se propone el uso del ácido fórmico o el metanol para almacenar H_2 de fuentes renovables con ciclos de almacenamiento y descarga con balance cero en emisiones de CO_2 .

4. Usos del hidrógeno

A parte de su potencial papel preponderante como elemento almacenador en la gestión de potencia de las redes eléctricas, el uso final del hidrógeno puede clasificarse en cuatro grandes grupos: transporte, energía para la industria, hidrógeno como materia prima de procesos industriales y energía residencial.

En la gran mayoría de estos sectores existe una elevada actividad dentro de los diversos grupos del CSIC, y en particular de los integrantes en la PTI Mobility2030. En cuanto a los proyectos relacionados con los usos del hidrógeno industrial, cabe destacar la participación de INCAR e ICB en el proyecto europeo anteriormente citado C4U [10] con la construcción a TRL7 de una planta integrada en la factoría de Arcelor Mittal, basada en tecnología Ca/Cu para producir una corriente de H_2/N_2 a partir del gas de alto horno. El INCAR también participa en el proyecto europeo CLEANKER [36], que pretende demostrar con un TRL7 mediante la construcción de una planta integrada en una cementera el concepto del Calcium Looping (CaL) en configuración de lecho arrastrado. Por otro lado, algunos proyectos que demuestran los usos del hidrógeno son el LIFE-REWIND [37], con participación del LIFTEC, en donde se ha implantado un sistema de generación fotovoltaica sin conexión a red, con acumulación eléctrica y producción de hidrógeno, el cual se ha utilizado para alimentar el riego por goteo en un campo de vid. El excedente de hidrógeno producido se utiliza en un vehículo todoterreno adaptado con una pila de combustible que se emplea en la finca. Otro ejemplo destacado es el proyecto Hy-BCN [38], con participación del IRII, en el que se va a desarrollar un sistema de pila de óxido sólido reversible, operando tanto en modo electrolizador como en modo pila de combustible, de manera que sea adecuada para la mejora de la gestión de fuentes de energía renovables locales. Por último, destacar el proyecto ECOELECTRICITY [19] con participación del ITQ, en donde el H_2 generado se ha utilizado para generar energía eléctrica y calor con una SOFC que carga las baterías de una

barredora en la destilería.

En cuanto aplicaciones en el sector transporte, cabe destacar el proyecto DOVELAR, con participación del IRII y LIFTEC, en donde el objetivo final es contribuir a la mejora de los sistemas de propulsión de coches eléctricos con pila de combustible PEM, incluyendo una plataforma robótica omnidireccional, un avión de ala fija pilotado remotamente y una plataforma acuática de superficie pilotada remotamente. Además, el IRII también participa en el proyecto europeo INN-BALANCE [39]. Los principales objetivos del proyecto son la entrega de componentes optimizados, la reducción del coste de fabricación y la presentación de las últimas tecnologías en coches de pila de combustible PEM.

En lo referente a aplicaciones portátiles, el INMA [40] en colaboración con BSH Electrodomésticos, está desarrollando un stack portátil SOFC microtubular [41] para alimentar una nevera portátil de bajo consumo, dentro del proyecto MicroPortableSOFC. Dentro de las aplicaciones estacionarias, los proyectos se centran fundamentalmente en el sector residencial. Por ejemplo, dentro del proyecto MICA-PEM [42], se están desarrollando sistemas CHP basados en PEM con el objetivo de disminuir el consumo e incrementar la eficiencia en casas aisladas de la red eléctrica con participación del LIFTEC y el IRII.

Por último, la mayor parte de los grupos del CSIC que integran el área de Tecnologías del Hidrógeno dentro de la PTI Mobility 2030 tienen amplia experiencia en el desarrollo de catalizadores avanzados, materiales nanoestructurados y en general todo tipo de componentes para pilas poliméricas (PEMFC), de óxido sólido (SOFC) y de carbonatos fundidos (MCFC), y también para el aprovechamiento de residuos o el reformado de gases. Por ejemplo, en el ICMS se desarrollan recubrimientos y películas delgadas catalíticas utilizando técnicas PVD (deposición física desde fase vapor), para aplicaciones de generación y combustión catalítica de hidrógeno [30]. Además, el ICB [23] a través de los proyectos ENE2017-83976-C2-1-R y ENE2014-52158-C2-1-R ha desarrollado catalizadores siguiendo dos estrategias principalmente: (i) la mejora del soporte carbonoso (nanofibras, geles o carbones mesoporosos) en catalizadores basados en nanopartículas de metales nobles como el platino, a fin de mejorar tanto la actividad como la durabilidad por ejemplo mediante hibridación; (ii) la preparación de materiales grafénicos dopados con nitrógeno para la obtención de nanocomposites híbridos que catalicen la reacción de reducción de oxígeno con Co, Ti o Ta sin necesidad de usar metales nobles. Otro proyecto destacado, con participación del INMA, es el 3DPASSION en donde se va a optimizar el área superficial de dispositivos de estado sólido para aplicaciones energía, incluyendo pilas SOFC, empleando técnicas de procesado 3D avanzadas como la estereolitografía (SLA), la impresión por inyección y el mecanizado láser. Por último, el ICP dentro del proyecto europeo PEGASUS está desarrollando catalizadores para pilas poliméricas

libres de Pt y otros materiales críticos de tal manera que se mantenga la estabilidad y la eficiencia apropiada para su uso como catalizadores en cátodos PEMFC [43]. El grupo del ICP también participa activamente en procesos power-to-gas, dentro del proyecto RENOVAGAS desarrollando catalizadores de metanación [12].

5. Conclusiones, Recomendaciones, etc.

Aunque el objetivo fundamental de la PTI Mobility 2030 es el desarrollo de tecnologías que permitan una movilidad sostenible, sobre todo en entornos urbanos, es evidente que las tecnologías del hidrógeno van más allá. El hidrógeno es una pieza clave para la implantación masiva de las energías renovables en el sistema energético de cualquier país o región. La intermitencia de las fuentes sostenibles requiere de un almacenamiento, sobre todo estacional en el caso de España, que solo puede llevarse a cabo mediante el uso de las tecnologías del hidrógeno. La apuesta de la Hoja de Ruta del Hidrógeno [3] va en ese sentido.

Pero van a ser necesarios pasos muy seguros para que estas grandes esperanzas se plasmen en una realidad. Mientras que otros países llevan ya años desarrollando infraestructura, nosotros estamos en este momento en la línea de salida. Las empresas españolas que quieran posicionarse tendrán que seleccionar cuidadosamente el nicho de mercado al que pueden acceder. Y para esto va a ser imprescindible conocer tanto las capacidades del tejido empresarial como de los centros de investigación, de forma que se seleccionen áreas de negocio donde realmente se pueda competir a nivel internacional. Ni nos debemos limitar a ser ensambladores de equipos de importación, ni debemos intentar fabricar todos los componentes de la tecnología. Para ello va a ser de gran utilidad la Agenda Sectorial de la Industria del Hidrógeno [44], que se publicará en el primer semestre de 2021, y que contará con todos los agentes implicados en la cadena de valor del hidrógeno.

6. Agradecimientos

Grupo de Materiales Nanoestructurados y Microestructura del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMS). Grupo de Captura de CO₂ del Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR). Grupo de Investigaciones Medioambientales y Grupo de Conversión de Combustibles del Instituto de Carboquímica (ICB). Grupo de Procesado y Caracterización de Cerámicas Estructurales y Funcionales del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA). Grupo de Energía y Química Sostenibles del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP). Grupo de Control del Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRI). Grupo de Pilas de Combustible del Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC). Grupo de Conversión y Almacenamiento de Energía del Instituto de

Tecnología Química.

Plataforma Temática Interdisciplinar Movilidad 2030 (<https://pti-mobility2030.csic.es>).

7. Referencias

- [1] Pacto Verde de la Unión Europea: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
- [2] UNFCCC. The Paris Agreement, 2019; [cited 2019 31st Jan]; Available from: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>
- [3] Hoja de Ruta del Hidrógeno publicada por el MITECO: https://www.miteco.gob.es/images/es/hojarutadelhidrogeno_tcm30-513830.pdf
- [4] <https://www.icb.csic.es/grupo/grupo-conversion-de-combustibles-fosiles/>
- [5] Pinilla J.L., Suelves I., Lázaro M.J.; Moliner R., Palacios J.M. Parametric study of the decomposition of methane using a NiCu/Al₂O₃ catalyst in a fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010; 35: p. 9801-9809.
- [6] <https://www.icb.csic.es/grupo/grupo-de-investigaciones-medioambientales/>
- [7] <https://www.incar.csic.es/capco2/>
- [8] Abanades, J.C, Murillo R. Method of capturing CO₂ by means of CaO and the exothermic reduction of a solid, US8506915 B2. Priority date Sept 16, 2009.
- [9] Martínez, I., Fernández, J.R., Martini, M., Gallucci, F., van Sint Annaland, M., Romano, M., Abanades, J.C. Recent progress of the Ca-Cu technology for decarbonisation of power plants and carbon intensive industries, *International Journal Greenhouse Gas Control*, 2019; 85: p. 71-85.
- [10] Web Proyecto C4U <https://c4u-project.eu/>
- [11] <http://itqmembranes.itq.webs.upv.es>
- [12] <https://icp.csic.es/es/investigacion/grupos-de-investigacion/energia-y-quimica-sostenible-eqs/>
- [13] Navarro RM, Peña MA, Fierro JLG. Hydrogen production reactions from carbon feedstocks: Fossil fuels and biomass. *Chemical Reviews* 2007; 107 (10): 3952-3991.
- [14] Martínez, I., Romano, M.C. Flexible sorption enhanced gasification (SEG) of biomass for the production of synthetic natural gas (SNG) and liquid biofuels: Process assessment of stand-alone and power-to-gas plant schemes for SNG production. *Energy*, 2016; 11, p.615-30.
- [15] Web proyecto FLEDGED: <http://www.fledged.eu/>
- [16] Web proyecto GLAMOUR: <https://www.glamour-project.eu/>
- [17] Tesis Doctoral "Gasificación catalítica de biomasa para la producción sostenible de hidrógeno". Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/130200>
- [18] Sayas S, Quesada J, Carratala J, Beneito R, Chica A. Method for producing monolithic catalysts and use of same. Patente mundial WO2019048726 (A1), 2017
- [19] Web Proyecto Life-ECOELECTRICITY: <http://www.lifecoelectricity.eu/>

- [20] González-Pérez JJ, J.F. Da Costa-Serra JF, Chica A. Biogas dry reforming over Ni-Ce supported on nanofibered alumina. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45 (40): 20568-20581.
- [21] <https://www.icb.csic.es/grupo/grupo-conversion-de-combustibles-fosiles/>
- [22] <http://sagan.csic.es/web/es/grupos/procacef>
- [23] Luque-Centeno J.M, Martínez-Huerta M.J., Sebastián D.; Lemes G. ; Pastor E.; Lázaro M.J. Bifunctional N-doped graphene Ti and Co nanocomposites for the oxygen reduction and evolution reactions *Renewable Energy*, 2018, Vol.125, p.182-192.
- [24] Retuerto M, Pascual L, Calle-Vallejo F, Ferrer P, Gianolio D, Pereira AG, García Á, Torrero J, Fernández-Díaz MT, Bencok P, Peña MA, Fierro JLG, Rojas S. N-doped ruthenium perovskite electrocatalysts with improved oxygen evolution activity and durability in acidic media. *Nature Commun.* 2019; 10 (1): 2041.
- [25] Laguna-Bercero MA. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *J. Power Sources* 2012; 203: 4-16.
- [26] Monzón H, Laguna-Bercero MA, CO₂ and steam electrolysis using a microtubular solid oxide cell, *Journal of Physics: Energy* 2019; 2 (1): 014005.
- [27] Serra JM. Electrifying chemistry with protonic cells. *Nature Energy* 2019; 4(3): 178-179.
- [28] <http://www.liftec.unizar-csic.es/es/>
- [29] <https://www.iri.upc.edu/staff/maserra>
- [30] <https://nanomatmicro.icms.us-csic.es/>
- [31] Busqué R, Torres R, Grau J, Roda V, Husar A. Mathematical modeling, numerical simulation and experimental comparison of the desorption process in a metal hydride hydrogen storage system. *Int. J. Hydrogen Energy* 2018; 43: 16929-16940.
- [32] Paladini M, Arzac GM, Godinho V, Hufschmidt D, Jiménez de Haro MC, Beltrán AM, Fernández A. The role of cobalt hydroxide in deactivation of thin film Co-based catalysts for sodium borohydride hydrolysis. *Appl. Catal. B: Environmental* 2017; 210: 342-351.
- [33] <http://www.liftec.unizar-csic.es/es/actividades/lineas/pilas-combustible>
- [34] Profitable Small Scale Renewable Energy Systems In Agrifood Industry And Rural Areas: Demonstration In The Wine Sector (LIFE13 ENV/ES/000280).
- [35] Carroquino J, Roda V, Mustata R, Yago J, Valiño L, Lozano A, Barreras F. Combined production of electricity and hydrogen from solar energy and its use in the wine sector. *Renewable Energy*. 2018; 122: 251-263.
- [36] Web proyecto CLEANKER: <http://www.cleanker.eu/>
- [37] Web proyecto LIFE-REWIND: <https://liferewind.unizar.es/>
- [38] Web proyecto Hy-BCN: <https://www.iri.upc.edu/project/show/236>
- [39] Web proyecto INNBALANCE: <https://www.innbalance-fch-project.eu/>
- [40] <https://inma.unizar-csic.es/>
- [41] Orera VM, Laguna-Bercero MA, Larrea A, Fabrication methods and performance in fuel cell and steam electrolysis operation modes of small tubular solid oxide fuel cells: a review. *Frontiers in Energy Research* 2014; 2: 22.
- [42] Web proyecto MICA-PEM: <https://www.iri.upc.edu/project/show/167>
- [43] <https://www.pegasus-pemfc.eu/>
- [44] http://www.aeh2.org/images/stories/AEH2/200710_Noticiasjulio/np_agenda_sectorial_v2.pdf