

LA ELECTRÓLISIS COMO UNA HERRAMIENTA CLAVE DE LA DESCARBONIZACIÓN DEL SIGLO XXI

JAVIER BREY

H2B2

La economía del hidrógeno se perfila, hoy en día, como una alternativa real a la economía basada en los combustibles fósiles. Se plantea la posibilidad de producir «hidrógeno verde» desde energía renovable, y emplearlo como combustible alternativo para los sectores de movilidad, industria y residencial, y también para gestionar esa energía eléctrica de origen renovable. Y, en medio de todo este esquema, está la electrólisis, la posibilidad de separar

la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno mediante electricidad de origen renovable. En este sentido, actualmente, desde la empresa H2B2 se consideran varias tecnologías, en diferente grado de madurez, para el desarrollo de sus electrolizadores.

EL CONTEXTO DE LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO EN EUROPA Y ESPAÑA ↓

En Europa, el hidrógeno juega un papel fundamental, siendo buena prueba de ello su presencia en las estrategias actuales europeas. Así, el Pacto Verde establece el marco de sostenibilidad que pretende Europa: ser neutro en emisiones en 2050. Como siguientes pasos del Pacto Verde, el 8 de julio de 2020 se publicó la Estrategia Europea de Integración Energética y la Estrategia Europea de Hidrógeno [Comisión Europea, 2019; Comisión Europea, 2020]; y el 14 de julio de 2021 se publicaba el paquete denominado «Fit for 55». «Fit for 55» tiene como objetivo la

reducción de 55% de emisiones en 2030, abarcando la revisión de varias directivas, con un impacto significativo en el mercado del hidrógeno. Algunas de ellas son:

- En 2030, el 50% del consumo de hidrógeno en la industria (incluidos usos no energéticos) debe ser renovable
- En 2030, se ha de tener un mínimo de 2.6% de RFNBO en el transporte (RFNBO equivale a «renewable fuels of non biological origin», e incluye al hidrógeno renovable)
- Ha de haber una estación de servicio de hidrógeno cada 150 km en la red transeuropea de transporte; en este sentido, por España pasan dos corredores de la red TEN-T, el atlántico y el mediterráneo, estando Madrid y Sevilla contenidos
- En 2030, ha de haber una reducción del 55% de las emisiones en los nuevos vehículos ligeros

- En 2035, ha de haber una reducción del 100% de las emisiones en los nuevos vehículos ligeros

La aplicación en España del Pacto Verde se manifiesta en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Este Plan, enviado el 31 de marzo de 2020 a la Comisión Europea, recoge los principales objetivos de España en el terreno de la energía sostenible y la descarbonización de los diferentes sectores económicos.

El objetivo primario del PNIEC es lograr una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 en nuestro país del 23%, con respecto al valor del año 1990. Para lograr este objetivo, se plantean cuatro herramientas fundamentales

- El aumento de la eficiencia energética.
- Una mayor electrificación.
- Una disminución del consumo de combustibles fósiles.
- Un aumento de las energías renovables.

Como continuación del PNIEC, y a semejanza de la Estrategia Europea del Hidrógeno, en España surge la «Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable», presentada en octubre de 2020 por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España [MITERD, 2020]. Este documento recoge datos y objetivos a 2030 para España, tales como la instalación de 4 GW de electrolizadores (600 MW para 2024), un 25% de hidrógeno renovable en la industria, el despliegue de 150 estaciones de servicio de hidrógeno para el transporte, la existencia de dos líneas férreas circulando con hidrógeno, o la inversión de 8.900 millones de Euros en el sector hasta 2030 (de los cuales, ya se han asignado 1.555 millones procedentes del sector público). Como se puede apreciar, los objetivos de este documento (publicado en octubre de 2020) ya se han quedado obsoletos, habiendo sido superados por los del «Fit for 55» de julio de 2021.

Es en este marco de desarrollo de una economía limpia y sostenible basada en el vector energético hidrógeno en el que se sitúa la empresa tecnológica H2B2 Electrolysis Technologies, con sedes en España y Estados Unidos, y que desarrolla su labor en el ámbito de la electrólisis.

La empresa H2B2

En 2016, distintos profesionales con décadas de experiencia en el ámbito del hidrógeno, el sector financiero y la sostenibilidad crearon H2B2, bajo la firme convicción de la relación existente entre hidrógeno y energías renovables. Conociendo ya entonces que las renovables presentaban el techo de la red eléctrica, pusieron el objetivo en la electrólisis como canal de transformación de la energía eléctrica en

hidrógeno verde, que permitiría descarbonizar sectores tan relevantes como el industrial, el residencial o el transporte.

H2B2 participa activamente en diferentes asociaciones nacionales e internacionales del hidrógeno: Asociación Española del Hidrógeno (donde ostenta la presidencia); Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y las Pilas de Combustible (vicepresidencia y secretaría, a través de la Asociación Española del Hidrógeno) y lidera los grupos de trabajo sobre producción de hidrógeno y uso de hidrógeno en el sector transporte; Hydrogen Europe y European Clean Hydrogen Alliance (grupos de trabajo tecnológicos).

Desde su fundación, la empresa ha estudiado, entre otros, la producción de hidrógeno desde fotovoltaica o eólica, y trabajado en las aplicaciones de este gas en satélites, aviones, coches y estaciones de servicio. Gracias a una importante inversión en investigación y desarrollo, la empresa puede hoy ofrecer soluciones a medida para satisfacer las necesidades de los clientes en el marco de la Economía del Hidrógeno.

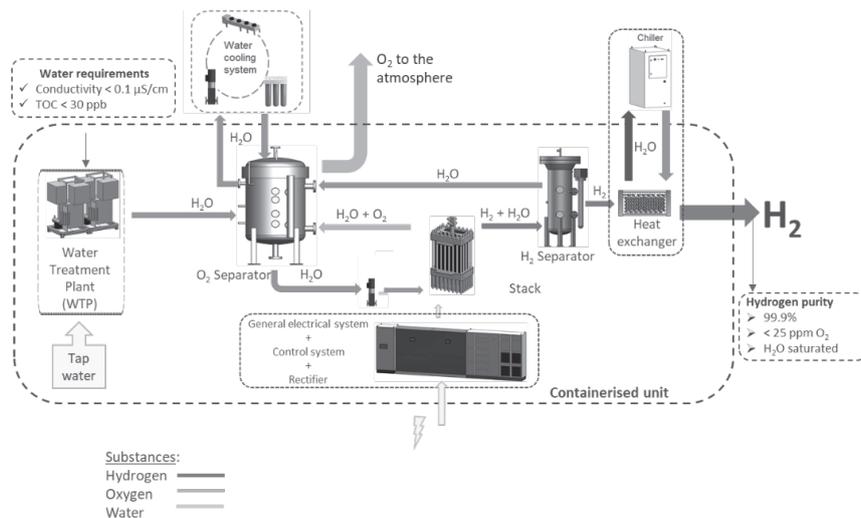
H2B2 es una empresa tecnológica especializada en sistemas de producción de hidrógeno basados en la electrólisis del agua. Con 4 patentes concedidas en tecnologías de producción de hidrógeno, la compañía ofrece un servicio integral: promueve, desarrolla, busca fórmulas de financiación, diseña, integra, construye, opera y mantiene dichos sistemas de producción de hidrógeno, configurados a medida para cada proyecto.

Además, la empresa está especializada en la producción limpia y sostenible de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovable. Sus soluciones modulares y eficientes permiten una producción de hidrógeno competitiva para uso industrial, residencial, almacenamiento energético y transporte.

H2B2 estructura su negocio en dos grandes líneas o unidades de negocio, Unidad de Negocio de Hidrógeno y Unidad de Negocio de Tecnología.

- La Unidad de Negocio de Hidrógeno se promueve la venta de este gas limpio. Así, H2B2 diseña soluciones o proyectos a medida para la venta del hidrógeno requerido por el potencial cliente, montando un proyecto integrado de manera completa, desde la definición del proyecto a la operación y mantenimiento del mismo, pasando por la búsqueda de financiación, ingeniería, construcción y pruebas de la propia planta, así como su permisología.
- La Unidad de Negocio de Tecnología promueve la venta de equipos completamente desarrollados por H2B2. En esta unidad, se abordan tres tipos de venta de equipos: a medida, adaptados de manera específica para el cliente, o equipos estándar, fabricados en serie.

FIGURA 1
ESQUEMA DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS



Fuente: Elaboración propia

En ambos casos, siempre se oferta el mantenimiento de los equipos, así como una asistencia técnica durante la operación de los mismos. En este sentido, cabe destacar que los equipos y sistemas desarrollados por H2B2 operan de manera automática, sin necesidad de intervención humana, pero con todas las garantías de seguridad y seguimiento personalizado.

EL PAPEL CLAVE DE LA ELECTRÓLISIS

Como se ha comentado con anterioridad, la pieza fundamental de la economía basada en el hidrógeno verde es la posibilidad de convertir la energía eléctrica de origen renovable (eólica, fotovoltaica) en hidrógeno verde; y eso hace que ese proceso, la electrólisis, juegue un papel fundamental.

La electrólisis (y los electrolizadores, que son los equipos en los que este proceso se lleva a cabo) se conoce desde el siglo XIX, y en la actualidad constituye una tecnología madura, pero con un amplio abanico de desarrollos en curso y de avances tecnológicos por llegar.

Teoría de la electrólisis

La descomposición electroquímica del agua o electrólisis consiste en hacer reaccionar sus iones en electrodos polarizados, utilizando corriente continua, obteniéndose como resultado en la zona catódica hidrógeno molecular en estado gaseoso y en la anódica, oxígeno, en iguales condiciones. Su forma de operación es inversa a la de una pila de combustible, es decir, lo que en un proceso actúa como reactivo se obtiene como producto en el otro y viceversa.

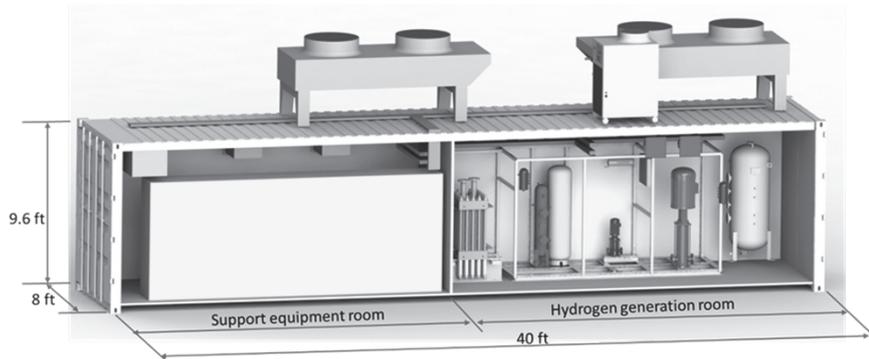
El dispositivo donde tiene lugar la electrólisis es el electrolizador, consistente en una serie de celdas con electrodos positivo y negativo (ánodo y cátodo, respectivamente). Ambos se encuentran sumergidos en agua, a la que tradicionalmente (tecnología más convencional o alcalina) se le ha añadido hidróxido de potasio (KOH) para que se polarice y sea conductora de la electricidad.

La cantidad de hidrógeno que puede generarse depende de la densidad de corriente (intensidad de corriente eléctrica por unidad de superficie). En general, el voltaje y la corriente requeridos son proporcionales, lo que conlleva también mayor potencia por unidad de hidrógeno. Sin embargo, al incrementarse la densidad de corriente del electrolizador, se reduce su tamaño, reduciéndose así el coste total [Grigoriev S.A., 2020].

Los electrolizadores tienen un alto rendimiento: entre el 65 y el 80% de la energía suministrada se convierte en hidrógeno. La cantidad de energía eléctrica requerida puede compensarse añadiendo calor: para que el agua se descomponga a 25 °C se requieren 1'47 V de tensión eléctrica; por encima de este valor se cede calor al ambiente y por debajo, hasta 1'23 V de tensión, se necesita un aporte de calor externo (esta solución de aportar calor externamente es ventajosa, pues el coste de esta energía térmica es más bajo que el de la electricidad).

Como ya se ha dicho, la tecnología de electrólisis, al producir hidrógeno a partir de agua y electricidad, permite la integración con fuentes de energía renovable que puedan dotarla de dicha electricidad, produciendo así hidrógeno verde. La variabilidad de las energías renovables exige de ciertas prestaciones a un equipo como un electrolizador que se deba conectar a ellas, entre otras la rapidez de respues-

FIGURA 2
DISPOSICIÓN DE LOS DIFERENTES BLOQUES DENTRO DEL ELECTROLIZADOR



Fuente: Elaboración propia

ta o la facilidad para operar a diferentes regímenes de carga; estas características son más evidentes, como se verá a continuación, en la electrólisis polimérica o PEM. Por otra parte, la electrólisis de alta temperatura permite la integración con energías renovables que generan calor, como es el caso de la solar termoeléctrica; existe hoy en día actividad investigadora para desarrollar este tipo de concepto.

Componentes básicos de un electrolizador

Un electrolizador es un sistema que integra varios subsistemas, de manera que se optimice el proceso propio de electrólisis. A los stacks o apilamiento de celdas electrolíticas (donde ocurre la reacción de separación de la molécula de agua), es necesario añadir un subsistema de suministro de potencia en corriente continua (integrando normalmente un convertidor electrónico AC/DC), un subsistema de tratamiento del agua de alimentación, y otros; a continuación, se describen brevemente:

– Stack

Es el responsable de producir el hidrógeno y el oxígeno a partir de agua, cuando se le suministra electricidad. Comúnmente, está formado por un conjunto o apilamiento de celdas electrolíticas.

– Sistema de tratamiento de agua

Es el sistema encargado de convertir el agua potable de la entrada del electrolizador en agua ultrapura, de acuerdo con los requerimientos del stack; de hecho, este sistema es crítico para el correcto funcionamiento del mismo. Comúnmente, los principales equipos involucrados en este sistema son los siguientes:

- Sistema de desionización, compuesto por un depósito de resinas cuyo objetivo es mantener la calidad del agua requerida por el stack.

- Planta de tratamiento de agua, para reducir la conductividad del agua, permitiendo optimizar el agua recuperada y usarla para reducir el agua de rechazo.

– Separadores de oxígeno e hidrógeno

Son equipos necesarios para separar el agua del oxígeno y del hidrógeno, productos obtenidos a la salida del stack. Además, el separador de oxígeno se utiliza como tanque de almacenamiento de agua para asegurar el suministro continuo de agua al stack.

– Sistema de potencia y control

Este sistema agrupa los equipos eléctricos, electrónicos y de control necesarios para apoyar la producción de hidrógeno. Comprende los siguientes equipos:

- Centro de control de motores
- Centralita
- Cuadro eléctrico, que contiene el rectificador para alimentar el stack y el panel de distribución para alimentar las cargas auxiliares
- Fuente de alimentación ininterrumpida (que suministrará energía a los equipos críticos en caso de un fallo eléctrica para mantener los equipos en un estado seguro)
- Sistema de control

El sistema de control monitorea variables y sensores, analiza los diferentes estados y permite el accionamiento de válvulas y actuadores, entre otras tareas; además, está conectado a la fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) para garantizar un apagado controlado y de seguridad.

– Intercambiador de calor

Es el equipo utilizado para enfriar la corriente de hidrógeno antes de su entrega.

– Sistema de purificación de hidrógeno

Este sistema es el responsable de garantizar la pureza del hidrógeno, siendo capaz de retirar el oxígeno y la humedad que sean necesarios para obtener la pureza requerida por el usuario.

– Sistema de refrigeración

El electrolizador incluye su propio sistema de enfriamiento, no se necesita agua de enfriamiento externa. El sistema de enfriamiento interno se subdivide, a su vez, en:

- Chiller: Intercambiador de calor (comentado en párrafos previos): para enfriar el hidrógeno producido.
- Enfriadores de aire: para eliminar el calor producido en el proceso de electrolisis.

Tecnologías de electrólisis ↓

Existen distintos tipos de electrolizadores, clasificados en función del tipo de electrolito con el que operan [Lee B., 2021]:

- Electrólisis alcalina o AEL
- Electrólisis polimérica o PEM
- Electrólisis aniónica o AEM
- Electrólisis de óxido sólido o SOEL

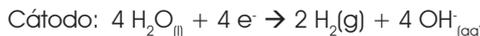
Los electrolizadores más utilizados en la actualidad se basan en stacks alcalinos, por su precio, madurez y disponibilidad en unidades grandes, pero la electrolisis tipo PEM (Proton Exchange Membrane) está mostrando más interés porque es más compacta, más ecológica y más fácilmente integrable con energías renovables. Por su parte, los electrolizadores de óxido sólido y de tecnología AEM se contemplan como opciones viables a medio plazo, con sus ventajas propias.

Electrólisis alcalina ↓↓

La electrolisis alcalina del agua es una de las dos principales tecnologías, junto a los electrolizadores PEM. Es la tecnología más madura; debido a su desarrollo, es también la más económica. Su eficiencia se sitúa en el rango 62-82%, siendo mayor cuanto mayor sea el tamaño del electrolizador.

Un electrolizador alcalino convencional consta de ánodo y cátodo (normalmente de níquel), y un separador entre las cámaras de ambos electrodos que es permeable a los iones de hidróxido y a las moléculas de agua. Para operar en un medio alcalino, se añade un electrolito como el hidróxido de potasio (KOH), hasta tener una disolución con valo-

res cercanos al 30% en concentración de KOH. El objetivo es desplazar la reacción del ánodo hacia la formación de oxígeno. En el cátodo se forman burbujas de hidrógeno y en el ánodo de oxígeno, recogidas de forma independiente en cada una de las cámaras [Marini S., 2012].



En la configuración de electrodos por inmersión, hidrógeno y oxígeno permanecen separados por una membrana impermeable a gases que divide la celda electrolítica. Las burbujas de gas que se forman en los electrodos disminuyen la superficie activa de los mismos, lo que supone una resistencia para el electrolito. Cuando se aplican densidades de corriente elevadas, el flujo de burbujas aumenta, cubriendo una parte importante del electrodo; a gran escala, esta configuración se hace inviable.

La segunda configuración, con electrodos porosos, elimina el problema de las burbujas mediante el uso de un fieltro fino de celulosa que contiene el electrolito absorbido y confinado entre dos separadores hidrofílicos, que están presionados por ánodo y cátodo. El uso además de electrodos porosos, permeables al agua y al electrolito, permite alcanzar la configuración «zero gap»; el objetivo es hacer mínima la resistencia de la disolución.

La última configuración cuenta con dos electrodos, cada uno con una red de níquel y una capa de difusión de gases de níquel o acero inoxidable, con conductos para el gas y para purgar el electrolito que se pueda filtrar.

La electrolisis alcalina puede ser de baja o de alta presión. La de baja presión (denominada atmosférica) proporciona flujos de gas con más impurezas (pureza del hidrógeno del 99%); a tener en cuenta que, si se desea almacenar los gases producidos, se deberá disponer de un dispositivo que los comprima; a su favor, el hecho de que son más económicos, siendo las placas de las celdas de acero inoxidable. Los electrolizadores alcalinos de alta presión (permiten la producción de hidrógeno a presiones de hasta 50 bar), por el contrario, presentan mejores eficiencias.

La tecnología alcalina se sigue tratando de optimizar para lograr sistemas que obtengan una cierta presión de salida del hidrógeno (15 bar es un objetivo práctico a 2025), una mayor amplitud de régimen de carga (llegando a valores de 15-10% para plantas multi-MW, aunque ello se logre con un cierto consumo energético parásito) y un menor coste de inversión (para una planta de 5 MW de electrolisis, pasar de un CapEx de 830 a 600 €/kW en 2025).

Electrólisis polimérica ↓↓

La electrolisis PEM (de su denominación en inglés, Proton Exchange Membrane) se basa en la con-

FIGURA 3
DETALLE DE UN ELECTROLIZADOR PEM

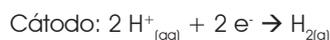


Fuente: Elaboración propia

ducción de los protones a través de una membrana, fabricada con un polímero fluorado y sulfonado. La membrana puede variar su grosor (rango 25-250 μm).

Los componentes de un electrolizador PEM son la membrana, los electrodos con catalizadores (de platino e iridio, usualmente) y las capas de difusión de gases (GDL, Gas Diffusion Layer). La función de estas últimas es proporcionar un camino a los gases entre electrodos y canales de flujo, transmitir calor durante la operación en la celda electroquímica, y aportar resistencia mecánica al conjunto de membranas.

Los polímeros conductores de iones que forman la membrana tienen un doble objetivo: transportar cargas eléctricas entre cátodo y ánodo, y separar los productos formados en cada electrodo. El agua líquida se consume en el ánodo formando oxígeno. El protón formado queda rodeado de moléculas de agua (solvatado) y se transfiere, por efecto eléctrico, a través de la membrana. Una vez en el cátodo, cesa la solvatación, produciéndose la reacción de formación de hidrógeno a partir de dos protones [Lee H., 2020].



La membrana, al estar tratada con un ionómero ácido, hace que el uso de catalizadores se vea limitado a metales de transición raros, que ante condiciones ácidas ofrecen un comportamiento estable: rodio, rutenio, platino, iridio y óxidos de los mismos. En la tecnología actual se emplea platino en el cátodo y óxido de iridio en el ánodo. La investigación tiende a buscar catalizadores que mejoren la eficiencia de ambos procesos (oxidación del agua y reducción del protón) y reduzcan los costes.

Se tienen dos placas de titanio u otros materiales que delimitan la celda electroquímica; entre ellas se encuentra el ensamblaje membrana-electrodo (MEA, Membrane Electrode Assembly). El agua cir-

cula por los canales mecanizados en las placas de titanio. Las mezclas bifásicas de agua y oxígeno, y agua e hidrógeno, se recogen por los escapes del ánodo y del cátodo, respectivamente.

Entre las placas de titanio y la MEA hay un hueco ocupado por colectores de corriente; su objetivo es transmitir la electricidad desde las placas de titanio hasta cada uno de los lados de la MEA. Además, su porosidad permite el paso al agua líquida y a los gases. Esta capa suele estar formada por partículas de titanio u otro metal inerte [Ayers K., 2021].

La electrólisis PEM requiere agua desionizada para llevarse a cabo, lo que supone un coste a añadir al sistema. La razón es que los metales tienden a penetrar en la membrana, haciendo que su resistencia interna aumente.

Por su menor grado de madurez (frente a la alcalina), la electrólisis PEM ha logrado por el momento escalas menores de producción y su vida útil es más limitada. Las labores de desarrollo en esta tecnología se están fundamentalmente orientando a reducir su coste de inversión (para una planta de 5 MW de electrólisis, pasar de un CapEx de 1.300 a 900 €/kW en 2025) y aumentar su vida útil (de 40.000 a 50.000 h, en 2025).

Su dinámica de operación ya le permite operar prácticamente en cualquier régimen de carga (0 - 100%), con velocidades de respuesta mucho más ágiles que la tecnología alcalina.

Esta tecnología permite además obtener corrientes de hidrógeno a alta presión; la tecnología PEM es más adecuada para ello que la alcalina, por tener celdas de menor tamaño (superficie) y por tener una integración mecánica más simple (uso de un electrolito sólido, como es la membrana). Se logran ya actualmente 30-60 bar de presión a la salida del electrolizador PEM, lo que simplifica y abarata soluciones de integración que requieren etapas posteriores de compresión.

Electrólisis AEM

La tecnología AEM (Anion Exchange Membrane), actualmente en desarrollo, combina los principios de las tecnologías alcalina y PEM, dando lugar a una variante que trata de aprovechar las ventajas de ambas. Cabe destacar el hecho de que está aún en grado de desarrollo, no habiendo alcanzado aún la industrialización de las dos primeras.

La electrólisis AEM separa el agua en hidrógeno y oxígeno por medio de una membrana, al igual que sucede en la electrólisis PEM, pero en este caso la membrana es aniónica. Son los iones hidroxilo los que difunden a través del sistema AEM, a la sección del ánodo; mientras que los electrones son transportados por un circuito externo hasta el mismo ánodo, donde se da la reacción de formación de la molécula de hidrógeno.

La electrólisis AEM se asemeja a la electrólisis alcalina (de hecho, comparte las mismas reacciones básicas), pero en vez de utilizar un electrolito líquido emplea una membrana aniónica. Esto hace a la electrólisis AEM más compacta que la alcalina y evita el problema del efecto burbuja que surgía en aquella [Pushkareva I.V., 2020].



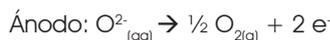
El agua entra a través del ánodo, llega al cátodo, se reduce y forma hidrógeno e iones hidroxilo gracias al aporte de electrones. La atracción positiva del ánodo hace que los iones hidroxilo difundan a través de la membrana hasta el lado anódico de la celda. La reacción anódica consiste en la recombinación de iones hidroxilo para formar agua y oxígeno.

Al contrario que en la electrólisis alcalina, no es necesaria una concentración elevada de KOH; en los actuales desarrollos se está utilizando una disolución al 1% de K₂CO₃.

Electrólisis SOEC

La electrólisis de óxido sólido (tecnología en desarrollo) tiene una diferencia fundamental respecto a las otras tres tipologías: la temperatura de operación, que se sitúa en el rango 800-1.000 °C. Esta elevada temperatura hace que las eficiencias sean mayores, o, dicho de otro modo, el consumo eléctrico es menor por existir esta integración térmica.

A esta temperatura, la alimentación de agua al electrolizador se realiza en forma de vapor sobrecalentado. Al entrar en contacto con el cátodo se reduce, dando lugar a hidrógeno gas y aniones de oxígeno. En este momento entran en juego los óxidos sólidos, que actúan como electrolito, como separador entre los dos lados de la celda y como conductor de iones. Los iones de oxígeno migran al ánodo, donde se produce la reacción de formación de oxígeno gas. En la reacción anódica se obtienen también electrones, que circularán por un circuito externo, pasando a ser reductores en la reacción anódica al otro lado [Zhang X., 2013].



En los desarrollos actuales, la electrólisis de óxido sólido emplea como electrolito zirconia (ZrO₂) estabilizada con ytrio y óxidos de escandio. Este material presenta una buena conductividad iónica cuando se encuentra sometido a altas temperaturas.

Los principales componentes son las placas bipolares de acero inoxidable y la manganita recubierta del electrolito de zirconia. Trabajando a altas temperaturas, no se requiere el uso de catalizadores. Existe por tanto la posibilidad de utilizar electrodos que no

utilicen platino, aunque actualmente se siguen usando para asegurar un buen contacto eléctrico entre celdas. En el cátodo se utiliza un cermet (aleación de metal y cerámico) que contiene níquel y zirconio. En el ánodo se utiliza platino dopado con manganita de lantano.

Esta tecnología no requiere que el agua tenga una gran pureza, aunque se ha demostrado que las impurezas en el vapor de alimentación tienen una gran influencia en la velocidad de degradación.

Cabe destacar que está aún en grado de maduración industrial, estando menos desarrollada que la alcalina o la polimérica.

La apuesta tecnológica de H2B2

Como puede observarse, existen alternativas tecnológicas en distinto grado de madurez, y con diferentes ventajas, pero todas ellas van a contribuir al desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno verde en los próximos años.

En este sentido, H2B2 inició su etapa trabajando en electrólisis polimérica (PEM), por su madurez tecnológica y por su capacidad para integrarse con fuentes de energía renovable. En esta tecnología, ha desarrollado productos que van desde los 3 kW hasta los 3 MW, siempre atendiendo a sistemas modulares, fácilmente integrables (tanto con una fuente de energía renovable como con las instalaciones del usuario final), y sencillas de operar y mantener.

- Unidades pequeñas (3 – 12 kW de potencia eléctrica)

Son unidades modulares de electrolizadores a pequeña escala, integradas en una cabina, en el rango de producción desde los 0'5 Nm³ por hora, hasta los 2 Nm³ por hora.

Estos electrolizadores son óptimos para pequeños consumidores: laboratorios, residencias, pequeñas flotas, etc.

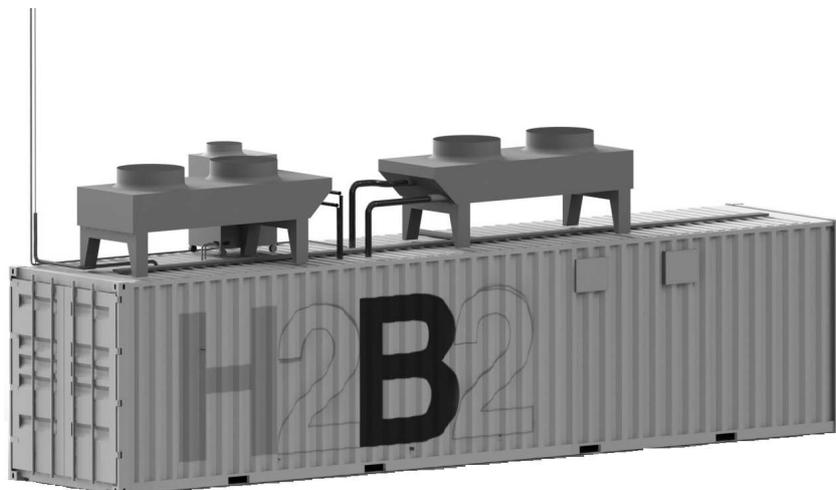
- Unidades medianas (53 – 330 kW de potencia eléctrica)

Se trata de unidades modulares de electrolizadores de tamaño medio, que encajan en un contenedor marítimo estándar de 10 a 20 pies (fácil manejo y transporte), y que siguen un enfoque «plug&play» (instalación fácil y rápida in situ), con unas capacidades de producción que abarcan desde los 10 hasta los 60 Nm³ de hidrógeno por hora.

- Unidades de gran potencia (500 – 3.000 kW de potencia eléctrica)

Son unidades modulares de electrolizadores con capacidades de producción que abarcan desde los 100 hasta los 600 Nm³ por hora, que encajan en un contenedor marítimo estándar

FIGURA 4
3D DE UN ELECTROLIZADOR DE 3 MW DE H2B2



Fuente: Elaboración propia

de 40 pies (fácil manejo y transporte), y que siguen un enfoque «plug&play» (instalación fácil y rápida in situ).

Estas unidades pueden agruparse para formar plantas de electrólisis en el rango de los cientos de MW, e integrar diferentes etapas de manejo del hidrógeno, tales como compresión, almacenamiento, dispensado, mezclado con gas natural, etc.

Todos los electrolizadores de H2B2 son fabricados en España, y están certificados y desarrollados según los códigos y normas europeas o americanas (según la ubicación del cliente). H2B2 suministra los electrolizadores con la etiqueta CE y, si es necesario, con la etiqueta ETL, así como los estudios de seguridad requeridos (por defecto, HAZOP).

Por otra parte, H2B2 cuenta con I+D y desarrollos propios en otras dos tecnologías: SOEC y AEM, con la idea de plantear alternativas y soluciones concretas optimizadas a las necesidades de los clientes. SOEC por su capacidad de integrarse con fuentes de energía térmica (disminuyendo así el consumo eléctrico para la producción de hidrógeno) y AEM por sus características de tomar lo mejor de alcalina y PEM.

EJEMPLOS DE PROYECTOS: H2B2

Desde su creación, H2B2 ha suministrado equipos a diferentes países, geografías y aplicaciones; desde la industria petroquímica hasta el sector de la energía; y desde Finlandia hasta Estados Unidos, pasando por Oriente Medio.

Sin duda alguna, lo más característico de los proyectos ha sido la capacidad de integración de la solución desarrollada, tanto con la producción de

energía como con la utilización del hidrógeno por parte del cliente final:

- Integración con los insumos

Básicamente, se persigue una integración con la energía eléctrica y el agua disponible en la planta. Desde el punto de vista eléctrico, ha de considerarse la disponibilidad y fluctuación del recurso (algo intrínseco a las fuentes de energía renovable), así como la naturaleza de la corriente (alterna o continua). Desde el punto de vista del agua, ha de diseñarse el sistema de tratamiento de agua de modo que se adecúe a la calidad del agua disponible en las instalaciones del usuario final.

- Integración con el consumo de hidrógeno

Dependiendo de la aplicación y uso final del hidrógeno, las etapas de salida de la planta se adecuarán de una u otra manera; por ejemplo, un repostaje de vehículos de hidrógeno va a requerir de una elevada pureza de este gas, seguida de una compresión a alta presión (más de 700 bar) y una estación de dispensado; un sistema de Power to Gas va a requerir menos pureza y presión, y un sistema de mezclado (blending) de hidrógeno con gas natural. Todo ello son soluciones desarrolladas y disponibles en H2B2.

El Proyecto Sohycal

El plan del programa de hidrógeno desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) establece la dirección estratégica y refuerza el compromiso por desarrollar en ese país el vector energético del hidrógeno, permitiendo su expansión por todo el territorio nacional. En diciembre de 2017,

FIGURA 5
ELECTROLIZADOR DE H2B2 INTEGRADO A ENERGÍA PV



Fuente: Elaboración propia

la Comisión de Energía de California (CEC) publicó la solicitud de subvención para «Instalaciones y Sistemas de Producción de Combustible de Hidrógeno Renovable para el Transporte» en el marco del programa de Transporte Limpio de la CEC (establecido en 2007, también conocido como Programa de Tecnología de Vehículos y Combustibles Alternativos y Renovables, ARFVTP por sus siglas en inglés). En este marco, H2B2 ganaba la licitación para la puesta en marcha de un proyecto clave en el estado de California para el impulso de la movilidad sostenible a través del hidrógeno. Con un presupuesto inicial de \$3,96M para la fabricación de tecnología, que se lleva a cabo en la sede de H2B2 en Sevilla, esta planta de producción y suministro de hidrógeno se ensamblará en la zona central de ese estado americano.

Denominado «Proyecto Sohycal», esta planta de tecnología puntera de electrólisis del agua tendrá una capacidad inicial de generación de hasta 2.000kg/día de hidrógeno renovable, que abastecerá a las diferentes estaciones públicas de servicio de la parte central del estado de California, para acelerar tanto

la democratización del uso de este combustible a nivel utilitario como el cumplimiento de la reducción de emisiones. Está programado que la planta de producción de hidrógeno finalice su desarrollo para el mes de abril de 2023.

Desde el punto de vista tecnológico, la planta integra electrolizadores PEM de hasta 6 MW de potencia alimentados desde energía solar fotovoltaica, con la idea de garantizar un origen 100% renovable del hidrógeno producido. La planta es ampliable, en una primera fase, hasta 10 MW, y será una de las mayores plantas de producción de hidrógeno renovable desarrollada en Estados Unidos con esta tecnología.

El programa de transporte limpio, con un comité asesor de 34 expertos, juega un papel fundamental en el logro de los ambiciosos objetivos del estado de California sobre el cambio climático, promoviendo el desarrollo acelerado de la reducción del petróleo y la adopción de vehículos de emisión cero, así como los estándares de calidad del aire. Invierte hasta 100 millones de dólares anuales en una amplia cartera de proyectos de transporte y combustible en todo el estado, así como el desarrollo económico sostenible a largo plazo.

EL FUTURO A CORTO PLAZO

España tiene mucho que decir en la economía del hidrógeno, por tres motivos fundamentales:

- Por un lado, porque va a ser un gran productor de hidrógeno renovable, produciendo no solo a en una mayor escala, sino también más barato que en el norte de Europa; esto le va a permitir, no solo autoabastecerse del hidrógeno que necesita para su industria, su transporte y su sector residencial, sino también poder exportar al norte de Europa.
- En segundo lugar, la ubicación geográfica de España le va a permitir ser el puerto de entrada del hidrógeno renovable que, con destino al norte de Europa, se va a producir en el norte de África. Unido al punto anterior, se va a propiciar que España se convierte en un importante «hub» de hidrógeno renovable.
- En tercer lugar, está la capacidad tecnológica. En España existen empresas (pequeñas, medianas y grandes) y centros de investigación que han desarrollado en el pasado y continúan desarrollando tecnología, productos y equipos relacionados con el hidrógeno renovable. Estos actores van a poder exportar fuera de España, y jugar un papel clave en toda la cadena de valor del hidrógeno.

Merece la pena detenerse un momento en el tema del coste del hidrógeno renovable. En la actualidad, el hidrógeno fósil (marrón o gris) tiene un coste estimado de 1'5 – 2'5 €/kg. Esto queda lejos de la estimación de los costes que podría tener, hoy en

día, una producción de hidrógeno verde en España (3'5 – 5'0 € por kilogramo) [Hydrogen Europe, 2020]; sin embargo, esta cifra puede reducirse significativamente en el futuro, mediante el despliegue de proyectos de demostración, algo que está ahora mismo en marcha.

Siguiendo los objetivos y medidas de la Hoja de Ruta del hidrógeno en España (tanto a nivel de despliegue de electrolizadores, como a nivel de inversiones), se estima que se podría alcanzar un coste de 2 € por kilogramo antes de 2030, y tan solo 1€ por kg para poco después de esa fecha. Esto haría que el hidrógeno verde pudiese competir no sólo con el hidrógeno fósil, sino también con el uso de gas natural para calentar hogares e industria.

También cabe destacar como importante el hecho de que España disponga de actores (universidades, empresas, centros tecnológicos, industria...) en todos los eslabones de la cadena de valor del hidrógeno; desde hace décadas, en este país se trabaja desarrollando equipos, sistemas y proyectos relacionados con el hidrógeno renovable (la primera planta se ponía en marcha en 1992).

En este entorno, H2B2 trabaja con numerosas universidades y centros de investigación españoles con la idea de desarrollar y ofrecer la mejor tecnología desarrollada en nuestro país, para producir hidrógeno renovable no sólo en Europa, sino también en otros continentes. Para ello, coordina desarrollos a diferentes escalas, y en el marco de distintos programas, desde su centro de I+D ubicado en Sevilla.

CONCLUSIÓN

Diferentes organismos han ido haciendo predicciones sobre la penetración de la Economía del Hidrógeno hacia mediados del siglo XXI; así, según Hydrogen Council:

- Se estima que, para el año 2050, el hidrógeno podría alimentar a una flota mundial de más de 400 millones de automóviles, unos 20 millones de camiones, y unos 5 millones de autobuses, lo que constituiría, aproximadamente, de un 20 a un 25 % en sus respectivos segmentos. Se calcula también que el 20 % de las locomotoras ferroviarias que actualmente utilizan diésel como combustible serán movidas mediante el uso de hidrógeno.
- Para ese año, se estima que 1.500 TWh de energía eléctrica serán generados anualmente a partir de hidrógeno, lo que supondrá, aproximadamente un 10 % de la demanda eléctrica.
- Se espera que, para mediados del siglo XXI, los países cuenten con redes de gas que distribuyan hidrógeno como un combustible limpio para hogares e industria.

- Para el año 2050, el hidrógeno satisfará un 18 % de la demanda final de energía, y gracias a su uso se evitarán en el mundo anualmente la emisión de 6 Gt equivalentes de CO₂.

En definitiva, se trata de una revolución energética, que afecta a todas las geografías y a todos los sectores; una oportunidad de crecimiento sostenible que debe ser aprovechada, y así lo están entendiendo los diferentes estamentos de la sociedad. España puede jugar un importante papel, exportando no sólo hidrógeno verde, sino también tecnología y equipos, y H2B2 está preparada para ello.

REFERENCIAS

- Ayers K., 2021. «High efficiency PEM water electrolysis: enabled by advanced catalysts, membranes, and processes». *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 100719
- Comisión Europea, 2019. «Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones sobre el Pacto Verde Europeo». EU COM/2019/640 final
- Comisión Europea, 2020. «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe». COM(2020) 301 final
- Grigoriev S.A., Fateev V.N., Bessarabov D.G., Millet P., 2020. «Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology». *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, Issue 49; 26036-26058
- Lee B., Lim D., Lee H., Lim H., 2021. «Which water electrolysis technology is appropriate?: Critical insights of potential water electrolysis for green ammonia production». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110963
- Lee H., Lee B., Byun M., Lim H., 2020. «Economic and environmental analysis for PEM water electrolysis based on replacement moment and renewable electricity resources». *Energy Conversion and Management*, 224, 113477
- Marini S., Salvi P., Nelli P., Pesenti R., Villa M., Berrettoni M., Zangari G., Kiros Y., 2012. «Advanced alkaline water electrolysis». *Electrochimica Acta*. 82; 384-391
- MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), 2020. «Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable»
- Pushkareva I.V., Pushkarev A.S., Grigoriev S.A., Modisha P., Bessarabov D.G., 2020. «Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis». *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, Issue 49; 26070-26079
- Zhang X., O'Brien J.E., O'Brien R.C., Hartvigsen J.J., Tao G., Housley G.K., 2013. «Improved durability of SOEC stacks for high temperature electrolysis». *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, Issue 1; 20-28