

TECNOLOGÍAS DE LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

EMILIO NIETO

Centro Nacional del Hidrógeno

El hidrógeno es una de las soluciones para la descarbonización, que está muy presente actualmente con la publicación de numerosas hojas de ruta para alcanzar el despliegue de la llamada economía del hidrógeno para lograr cumplir los ansiados objetivos climáticos definidos hasta la neutralidad climática en 2050.

Las aplicaciones principales son la industria química básica (producción de amoníaco, metanol, siderurgia, biocombustibles, combustibles sintéticos, cemento, cerámica, vidrio, grasas, residuos, biotecnología), la industria petroquímica (producción de combustibles convencionales), la generación eléctrica a gran escala (tanto mediante el uso en pilas de combustible como en turbinas de gas o motores de combustión interna), y en movilidad (vehículos ligeros y pesados, ferrocarriles, barcos, aviones y logística (carretillas, maquinaria centros logísticos)). Hoy en día, la mayor parte del hidrógeno utilizado es hidrógeno gris proveniente de fuentes no renovables, y en el futuro será verde.

El consumo nacional de hidrógeno es actualmente de unos 55 TWh, principalmente en los procesos de producción de materiales en el sector industrial. Aproximadamente el 45% se emplea en la industria petroquímica, otro 45% en la industria química, y el 5% en la industria siderúrgica. El restante se distribuye entre el resto de aplicaciones industriales con un menor volumen (vidrio, grasas, etc).

Las tecnologías del hidrógeno son clave para la mejora de la productividad y competitividad empresarial, basadas en un sistema de generación renovable a partir de fuentes no gestionables. Actualmente, las tecnologías de almacenamiento de energía, mayoritariamente basadas en baterías, se sitúan en el rango temporal (días o semanas) y de potencia (MW), y ahí el hidrógeno permite almacenar grandes cantidades de energía (escala GW) durante largos periodos de tiempo de forma estable y sin perder sus prestaciones (almacenamiento estacional). Por lo tanto, el hidrógeno aporta una gran flexibilidad basada en que puede ser producido a partir de numerosos recursos, tanto a gran escala como a pequeña escala, porque puede ser almacenado en forma de gas o en forma líquida durante largos periodos de tiempo y ser transportado a largas distancias, y, finalmente, porque puede ser utilizado como un combustible libre de carbono en múltiples aplicaciones. La forma más fácil de descarbonizar es, sin duda, disponer de un sistema desarrollado de electricidad limpia renovable, y electrificar la mayor parte posible de la demanda energética.

Aunque la dificultad de electrificación de algunos sectores, como por ejemplo el transporte a larga distancia, es lo que hace clave a un vector energético como el hidrógeno.

Asimismo, se logrará el acoplamiento entre el sector eléctrico y otros sectores claves como el gasista, a la vez que se logrará una drástica reducción de emisiones. En este sentido, las tecnologías Power-to-X, que emplean electricidad para la producción de hidrógeno renovable o sus derivados, aumentan el interés de la producción de hidrógeno con los excedentes renovables y, por lo tanto, se alcanza un máximo aprovechamiento de la energía y su distribución entre sectores y regiones. Éstas incluyen Power-to-Gas, hidrógeno o metano sintético; Power-to-Fuel, combustibles sintéticos; y Power-to-Power para re-electrificar el hidrógeno almacenado.

Del mismo modo, el hidrógeno va a ser un combustible alternativo clave en el sector de la movilidad responsable de una gran cantidad de emisiones de GEI. Existe una clara apuesta por el transporte sostenible basado en hidrógeno con un escenario internacional presente y futuro muy prometedor. Este desarrollo requiere infraestructuras de suministro que abastezca a los vehículos eléctricos de pila de combustible que utilizan hidrógeno, y esto ocurrirá en los siguientes años para disponer de un mínimo de puntos de repostaje que ofrezca la suficiente garantía de suministro.

Es clave hacer al hidrógeno competitivo, y para ello se están planteando soluciones en las que la producción del hidrógeno se genera en el mismo sitio de consumo, controlando así los costes. Asimismo, es necesario desarrollar el mercado y las aplicaciones de uso para dar salida a ese hidrógeno. Y además, se deben establecer y generar colaboraciones público-privadas imprescindibles para el desarrollo de la economía del hidrógeno. La administración debe acompañar a la industria privada, darles garantías y general el clima propicio para poder desarrollar las inversiones (normativa, permisos, certificaciones, etc).

Nuestro país se puede y debe posicionar como referente tecnológico en este sector como principal productor y exportador de hidrógeno renovable de Europa. Lograr una mayor penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico, pudiendo aumentar y controlar su gestionabilidad nos puede convertir en una de las potencias europeas de generación de energía renovable y de producción de este hidrógeno verde. Contamos con capacidad suficiente para garantizar el autoabastecimiento (generando riqueza local), y poder exportar los excedentes a otros países. Por nuestra situación geográfica, debemos jugar un papel clave en la cadena de transporte entre el norte de África (con alto potencial de producción de hidrógeno renovable). Podemos ser un país tractor en la creación de un mercado (trading) del hidrógeno en Europa, aprovechando nuestra excelente infraestructura gasista existente para el transporte eficiente del hidrógeno a gran escala. La creación de nuevas

líneas de desarrollo permitirá nuevos empleos de alta cualificación.

La hoja de ruta del hidrógeno definida por nuestro país es un espaldarazo al desarrollo de todas nuestras capacidades tecnológicas clave para su despliegue masivo y la consecución de los objetivos de neutralidad climática en 2050. Está plenamente alineada con la Estrategia Europea del Hidrógeno y con los objetivos definidos por todos los países europeos en su conjunto. Y para ello, se definen una serie de objetivos nacionales para 2030 y 2050, que no sólo se focalizan en la producción de hidrógeno renovable sino también a cada una de las áreas de actividad con mayor potencial de crecimiento futuro como son la industria, la movilidad y el sector eléctrico o almacenamiento de energía. La consecución de los objetivos definidos facilitará el despliegue de inversiones estimadas en 8.900 millones de euros en la puesta en marcha de proyectos de producción de hidrógeno renovable y generación eléctrica renovable asociada, adaptaciones industriales y movilidad. Se logrará alcanzar un impacto medioambiental muy positivo al reducir las emisiones de 4,6Mton de CO₂eq a la atmósfera en el periodo 2020-2030. Se prevé que a partir del año 2030 se acelere el desarrollo de una economía basada en la producción y aplicación del hidrógeno renovable en España con el planteamiento de numerosos proyectos integrales como los que se están anunciando en estos meses. Con ello, las tecnologías de hidrógeno renovable deberían alcanzar su madurez y desplegarse a gran escala en el 2050.

De las 60 medidas definidas en dicha hoja de ruta española, una de ellas se centra en reforzar el papel del Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2) como centro de I+D+i público de referencia en la cadena de valor del hidrógeno. El CNH2 es un consorcio público de I+D+i que depende a partes iguales del Ministerio de Ciencia e Innovación y de la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha. Fue creado en el año 2007 y actualmente cuenta con 48 personas que cubren toda la cadena de valor del hidrógeno y las pilas de combustible. Dispone de un plan estratégico 2019-2022 que se centra en la producción, almacenamiento, transformación, integración, seguridad y aspectos sociales y económicos. Dispone de 13 laboratorios y 5 instalaciones auxiliares para poder cubrir toda la cadena de valor de cada una de las líneas estratégicas definidas. Las capacidades disponibles en base a las distintas infraestructuras y conocimiento disponible son las siguientes:

- Servicios de consultoría orientados a apoyar a entidades para implantar tecnologías relacionadas con el hidrógeno y pilas de combustible, tales como: Estudios técnico-económicos y planes de implantación de diferentes aplicaciones que utilicen hidrógeno como elemento principal; Ingeniería conceptual, básica y de detalle de instalaciones e infraestructuras; Estudios de Análisis de Ciclo de Vida, huella de carbono y

huella hídrica; Asesoramiento técnico y estudios de mercado; Estudios de seguridad, tramitación y legalización ante las administraciones públicas de los permisos para la implantación de infraestructuras; Creación de consorcios y búsqueda de financiación para el desarrollo de proyectos de I+D+i; Coordinación y gestión de proyectos de carácter tanto nacional como internacional; Divulgación y estudios de percepción social sobre los beneficios del uso del hidrógeno como vector energético; Formación técnica personalizada.

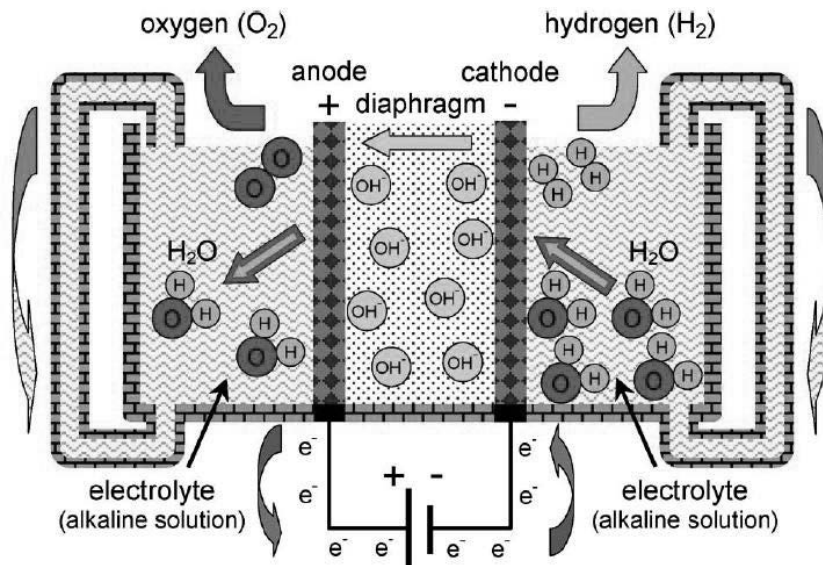
- Servicios integrales de ingeniería para el diseño, desarrollo, ejecución y puesta en marcha de instalaciones basadas en el uso del hidrógeno como vector energético, desde pequeñas instalaciones a nivel de laboratorio hasta plantas industriales cubriendo toda la cadena de valor: Ingeniería conceptual, básica y de detalle; Fabricación de bancos de ensayos «ad-hoc»; Desarrollo de plantas piloto y escalado industrial; Puesta en marcha y validación de sistemas; Estudios técnico-económicos; Asesoría en selección de equipos de hidrógeno; Asesoría en normativa y seguridad ATEX; Formación especializada.
- Producción de hidrógeno. Electrólisis Alcalina. Desarrollo y caracterización de membranas y componentes, el diseño y mejora de celdas electro-líticas mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) y la experimentación de stacks y sistemas de electrólisis a escala industrial, con el objetivo de analizar su durabilidad y optimizar su funcionamiento. En concreto, A nivel de componentes y celdas: Caracterización de electrodos por técnicas electroquímicas; Estudios de cinética electro-lítica; Determinación de resistividad iónica de membranas y diafragmas utilizados en electrolisis alcalina; Realización de curvas de polarización, cronoamperometrías, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS); Estudio sobre la respuesta de celdas de electrólisis frente a perfiles de energías renovables; Caracterización térmica y fluidodinámica de celdas de electrólisis alcalina; Prototipado rápido con impresora 3D; Estudios de degradación y corrosión. A nivel de stacks y sistemas: Evaluación y caracterización de su funcionamiento; Ensayos de larga duración, determinación de la durabilidad y el tiempo de vida; Ensayos de degradación y de vida acelerada; Testeo y validación de sistemas bajo la normativa ISO 22.734; Estudio y optimización de balances de planta; Diseño y construcción de bancos de ensayo de electrolisis alcalina.
- Sistemas de almacenamiento. Desarrollo de las diferentes líneas de trabajo relacionadas con el almacenamiento de hidrógeno en sus diversas modalidades y tipologías (hidrógeno comprimido y almacenamiento químico); Estudios de carga/descarga de larga duración y de comportamiento en operación de recipientes y sistemas de hidruros metálicos reversibles de baja temperatu-

ra; Estudios de comportamiento de materiales escalados para almacenamiento de hidrógeno en reactor autoclave hasta 100 ml; Pruebas de estanqueidad con H₂ y He en recipientes y sistemas de almacenamiento hasta 700 bar; Ensayos de pruebas hidráulicas por el método de camisa de agua y presurización directa hasta 1.100 bar; Inspección de interiores mediante videoscopia; Análisis de imperfecciones mediante ultrasonidos «phase-array»; Asesoramiento técnico en el diseño e implantación de instalaciones y sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

- Producción de hidrógeno y transformación. Tecnología PEM. Fabricación y escalado de conjuntos membrana electrodo (MEAs) y de componentes de electrolizadores y pilas de combustible como en la realización de ensayos y en la caracterización electroquímica de monoceldas y stacks de pequeña potencia: Fabricación de membranas poliméricas en base Nafion de espesores entre 25-200 micras; Prensado de MEAs para PEMFC y PEME; Fabricación de MEAs para PEMFC; Realización de curvas de corriente-voltaje (IV) de monoceldas de 5, 25 y 50 cm² de área activa y hasta 100 W; Caracterización electroquímica de monoceldas y stack de hasta 8 celdas y hasta 50 cm² de electrólisis PEM.
- Electrónica de potencia. Desarrollo de sistemas de control y comunicaciones para la monitorización de instalaciones y bancos de ensayos, como el desarrollo de sistemas de electrónica de potencia para sistemas de hidrógeno y pilas de combustibles, equipos de instrumentación y embebidos; Desarrollo de sistemas SCADA: control remoto vía internet, aplicaciones para móviles y minería de datos; Desarrollo de algoritmos avanzados de control: algoritmos de control a medida, control PID, lógica borrosa y control predictivo; Diseño y prototipado de PCB: esquemáticos, ruteados, fabricación de prototipos, soldaduras y testeo de placas PCB; Validación de convertidores de potencia: curva característica, eficiencia, termografía y ensayos según condiciones climáticas; Ensayos para la realización de simulaciones mediante hardware in the loop.
- Microrredes. Desarrollo y testeo de sistemas basados en las tecnologías del hidrogeno y su integración en microrredes y redes inteligentes. Análisis y estudio de la hibridación de los sistemas de hidrogeno con otras soluciones de almacenamiento de energía tales como baterías y supercondensadores: Testeo y validación de sistemas de almacenamiento híbrido de energía en una microrred real e integración de nuevos componentes a la microrred; Control predictivo basado en modelos matemáticos (MILP, MIQP, MINLP); Prototipado rápido de control de la electrónica de potencia de la microrred; Emulación P-HIL de redes complejas integradas en la microrred mediante modelos desarrollados en matlab/simu-

- link/simpower; Desarrollo de algoritmos de optimización y algoritmos de electrónica de potencia.
- Modelado y Simulación. Electrolisis, pilas de combustible y equipos auxiliares. Realización de simulaciones relacionadas con la gestión térmica y fluidodinámica de electrolizadores, pilas de combustible y equipos auxiliares, mediante el uso de software especializado tipo CFD (Computational Fluid Dynamics); Estudios de termografía para evaluar gradientes térmicos y distribución de temperaturas; Ensayos climáticos de componentes, celdas y stacks mediante ciclos de temperatura y humedad; Caracterización fluidodinámica de diferentes dispositivos electroquímicos mediante el uso de un sistema PIV y celdas con ventanas transparentes; Modelado de fenómenos electroquímicos, fluidodinámicos y térmicos involucrados en electrolizadores y pilas de combustible mediante simulaciones numéricas CFD (2D/3D); Desarrollo de modelos matemáticos para describir la evolución, el comportamiento y la monitorización de fugas de gas en entornos cerrados; Desarrollo de modelos matemáticos para evaluar y diseñar diferentes tipos de sistemas y aplicaciones basados en energías renovables; Formación para el manejo de software CFD.
 - Fabricación de pilas de combustible y electrolizadores de tecnología PEM de muy baja potencia y desarrollar sus BoPs y su control: Fabricación electrónica: diseño, ensamblado y testeo PCBs; Programación de microcontroladores; Escaneado, modelado y fresado en CNC; Prototipado en Arduino, Raspberry-Pi, RedPitaya, Littlebits; Realización de ensayos con energías renovables para alimentación de dispositivos de pequeña potencia y generación de hidrógeno; Proceso de distintos materiales, componentes y MEAS; Termografía de pequeños equipos de hidrógeno; Impresión de modelos en 3 dimensiones con PLA y ABS; Corte de vinilo; Caracterización y ensayos de pila de combustible de baja potencia; Grabado y corte láser de piezas en distintos materiales.
 - Caracterización de materiales. Caracterización química, morfológica y estructural de materiales y componentes de diversa naturaleza, como en el análisis, caracterización y control de calidad de materiales y componentes antes y después de su vida útil mediante diferentes técnicas: Experimentos térmicos simultáneos TGA-DSC; Ensayos TGA-DSC/FTIR; Ensayos de microscopía electrónica (SEM, EDX); Experimentos FTIR con opción ATR; Análisis semicuantitativo multielemental; Análisis cuantitativo de elementos; Digestión en horno microondas; Isotermas de adsorción-desorción; Adsorción de N₂ mediante superficie específica (área BET); Ensayos de quimisorción (H₂,CO); Ensayos a temperatura programada (TPR,TPO,TPD); Recubrimiento con oro y carbón; Análisis de imagen con microscopía óptica; Ensayos de perfilometría óptica.
 - Producción de hidrógeno y transformación. Tecnología de óxidos sólidos SO. Investigación, desarrollo y la operación de tecnologías de pilas de combustible y electrolizadores de óxido sólido contemplando desarrollo, integración y caracterización de materiales y sistemas: Síntesis de micro y nano fibras de materiales cerámicos, polímeros, metálicos o composites; Preparación de muestras para análisis SEM; Estudios de sinterizabilidad bajo diferentes atmósferas; Caracterización electroquímica de dispositivos SOFC o SOEC (EIS, I-V); Ensayos electroquímicos de larga duración (análisis de degradación); Caracterización reológica; Determinación de tamaño de partícula y potencial Z; Fabricación de soportes cerámicos, planos y tubulares; Deposición de capas delgadas.
 - Transformación de hidrógeno. Testeo de Tecnología PEM. Desarrollo de procedimientos de ensayos para pilas de combustible de membrana polimérica, contando con el equipamiento especializado necesario derivado tanto de desarrollos propios del centro como de soluciones comerciales: Ensayos de caracterización a nivel de stack de pila de combustible PEM en el intervalo 1-10 kW; Ensayos de caracterización de módulos y sistemas de pila de combustible PEM en el intervalo 10-30 kW; Ensayos de caracterización de módulos y sistemas de pila de combustible PEM hasta 150 kW; Ensayos en cámara climática visitable para todo tipo de muestras a temperatura o humedad controlada y/o ciclos climáticos de humedad y temperatura; Ensayos en sistema de vibración electrodinámico para todo tipo de muestras en modos de vibración sinusoidal, vibración «random» y choque clásico.
 - Aplicaciones de movilidad. Investigación y el desarrollo de las distintas configuraciones de la planta de potencia, su dimensionamiento y optimización de las estrategias de control de la energía, los convertidores de potencia y de motor, así como la integración de los sistemas de hidrógeno en vehículos: Diseño e integración de sistemas de H₂ sobre vehículos; Implementación de estrategias de control sobre ECU programable; Caracterización de motores eléctricos, controladores y convertidores de electrónica de potencia; Ensayo y caracterización de vehículos: Simulación de carga con revoluciones, velocidad y fuerza de tracción constantes. Curva de par-potencia, velocidad máxima, ciclos de conducción homologados o personalizados, pruebas de larga duración, recuperación de energía; Ensayos de la planta de potencia y sistemas auxiliares del vehículo en cámara climática, conectados al vehículo en funcionamiento sobre banco de potencia dinámico; Conexión de vehículos al sistema de microrredes del CNH₂ para realización de técnicas Vehicle to Grid (V2G); Pruebas en circuito para vehículos de pequeñas dimensiones.

FIGURA 1
ELECTROLISIS ALCALINA



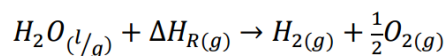
Fuente: Elaboración propia

- Aplicaciones domésticas. Testeo de integración de sistemas de producción de hidrógeno y transformación en entorno real para la demostración y el uso de las tecnologías de hidrógeno en el sector residencial. CNH2 ofrece la posibilidad de ensayo, experimentación y validación de equipos de hidrógeno en hogares, así como de sistemas de microgeneración de hidrógeno destinados a proveer de electricidad y calor: Ensayo y validación en campo de sistemas domésticos de microgeneración y de sistemas de ciclo de hidrógeno. Protocolos de pruebas y ensayos de larga duración. Optimización de equipos acoplados a una instalación doméstica real dotada de sistemas auxiliares, control-monitorización y provista de energías renovables; Estrategias de gestión energética y conexión a red para viviendas con generación distribuida y almacenamiento; Ensayo y validación de equipos auxiliares para instalaciones domésticas de H2; Plataforma para ensayo y validación de sistemas domésticos, IoT y smart metering; Alquiler módulo Demo Lab H2ome para su uso en proyectos de I+D o exhibición tecnológica en cualquier localización geográfica gracias a sus posibilidades de transporte y fácil instalación.
- Fabricación de bancos de ensayo y componentes de sistemas de hidrógeno y pilas de combustible. Desarrollo y la fabricación de componentes y elementos de sistemas de hidrógeno y pilas de combustible, placas terminales, placas bipolares, colectores de corriente y estructuras metálicas, así como el montaje de bancos de ensayo y estructuras soporte de sistemas. La instalación dispone de personal técnico cualificado y medios técnicos necesarios para montar bancos de

ensayo para equipos o sistemas a medida con los requerimientos necesarios. También se llevan a cabo pruebas para puesta en marcha y adaptaciones de los bancos de ensayo.

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES DE ELECTROLISIS

La producción del llamado hidrógeno verde a partir de energías renovables pasa generalmente por procesos de electrólisis. La electrólisis consiste en una corriente eléctrica continua que separa un compuesto en los elementos que lo forma. El compuesto más utilizado en este proceso es el agua, lo que da lugar a hidrógeno y también a oxígeno. El principio general de la electrólisis del agua puede expresarse de la siguiente manera:

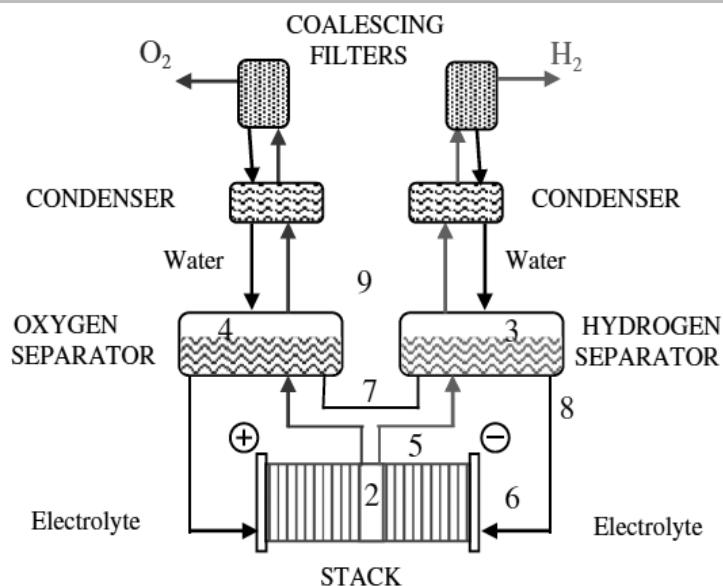


Actualmente, hay dos principales tipos de tecnologías disponibles en el mercado para la producción de hidrógeno mediante electrólisis: alcalina y polimérica (PEM).

Electrolisis Alcalina

Los electrolizadores alcalinos se constituyen a base de celdas compuestas de dos electrodos inmersos en un electrolito líquido (una disolución acuosa alcalina generalmente basada en hidróxido de potasio) y un diafragma poroso que actúa como separador entre cámara catódica y anódica. En cada una de estas celdas se produce una reacción electroquímica que da lugar a la liberación de hidrógeno y oxígeno. (ver figura 1)

FIGURA 2
BALANCE DE PLANTA



Fuente: Elaboración propia

Para que la cantidad de hidrógeno generada tenga un volumen considerable es necesario unir varias celdas, formando un stack o apilamiento. Además, aunque es en el stack donde se produce la electrolisis propiamente dicha, para el correcto funcionamiento del electrolizador es necesario acompañarlo de una serie de sistemas auxiliares que permitan su suministro de agua y energía, así como la obtención de los gases en las condiciones deseadas. El conjunto de estos sistemas auxiliares se denomina Balance de Planta (BoP en sus siglas en inglés) y está formado por el sistema de tratamiento y alimentación de agua, sistema de alimentación eléctrica, sistema de separación, sistema de eliminación de arrastre de electrolito, sistema de purificación y secado, sistema de análisis de gases, y sistema de control y seguridad. (ver figura 2)

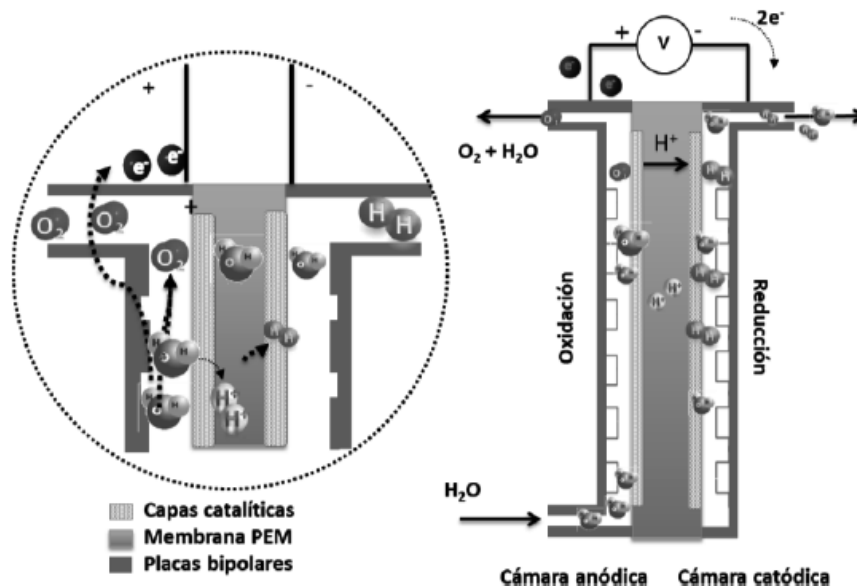
1. Sistema de tratamiento y alimentación del agua: este sistema se encarga de adecuar la conductividad máxima que es posible administrar al sistema, que típicamente debe ser inferior a los $0.2 \mu\text{S cm}^{-1}$, mediante un tratamiento de ósmosis inversa y electro-desionización.
2. Sistema de alimentación eléctrica: este sistema adecúa la corriente eléctrica que llega al electrolizador a los requerimientos fijados para el stack y el resto de sistemas auxiliares, ya sea procedente de una planta fotovoltaica o de la propia red eléctrica.
3. Sistema de separación: este sistema se encarga de separar los fluidos que componen las corrientes bifásicas que salen del ánodo y del cátodo del electrolizador mediante unos depósitos separadores. De esta manera, por la parte superior se

obtendría el gas (H_2 , O_2) y por la inferior el electrolito, que sería recirculado de vuelta al stack.

4. Sistema de eliminación de arrastre de electrolito: a partir de la utilización de un filtro de coalescencia se elimina la máxima cantidad de electrolito posible de las corrientes gaseosas.
5. Sistema de purificación y secado: este sistema permite lograr alcanzar una pureza superior al 99.5-99.9%, ya que a partir de la integración de un reactor de-oxo se consigue eliminar las trazas de oxígeno arrastradas. Esto es gracias a que se hace reaccionar las mismas con el hidrógeno y se decantan posteriormente, lo que permite alcanzar purezas superiores al 99.999%.
6. Sistema de análisis de gases: este sistema permite analizar trazas, tanto del H_2 como del O_2 , para cuantificar de manera continua la pureza de las corrientes gaseosas.
7. Sistema de control y seguridad: este sistema lleva a cabo el control del electrolizador de forma que su funcionamiento sea seguro para el entorno. Para ello, el sistema cuenta con una serie de instrumentación y valvulería controlada por un PLC.

La electrólisis alcalina es una tecnología muy madura a nivel industrial que en el rango de los MW de potencia ofrece muy altas capacidades de producción de hidrógeno. Esta tecnología tiene una durabilidad probada y un comportamiento muy bien conocido, siendo su vida útil es del orden de los 20 años con un cambio de stack a las 80.000 horas de funcionamiento. Además, presenta una gran disponibilidad y sus costes específicos son inferiores a los de otras tec-

FIGURA 3
ELECTROLISIS POLIMÉRICA (PEM)



Fuente: Elaboración propia

nologías. En su contra, los electrolizadores alcalinos tienen sus bajas densidades de corriente, el uso de electrolitos altamente corrosivos y el hecho de que requieran trabajar a una potencia estable para funcionar correctamente que debe estar entre el 30% y el 100% de su capacidad máxima. Es por ello que cuando van unidos a una planta de energía renovable, si la producción no es lo suficientemente grande como para incluir varios electrolizadores que puedan encenderse y apagarse en función de la generación de energía de la planta, hay que conectarlos a un suministro de energía adicional, como puede ser un rack de baterías o la propia red eléctrica.

Electrolisis polimérica (pem) ↓

Las celdas de los electrolizadores PEM, a diferencia de los alcalinos, presentan un electrolito sólido consistente en una membrana de intercambio protónico. Dicho electrolito separa los electrodos, compuestos por las placas bipolares. (ver figura 3)

Debido a que el electrolito es una membrana su construcción es más sencilla que en el caso de los electrolizadores alcalinos, por lo que son más compactos y de menor volumen. Además, a ambos lados de la membrana y de los distribuidores de corriente y de flujo se sitúan una serie de placas metálicas, conocidas como placas bipolares, donde se encuentran mecanizados los canales de distribución de flujo encargados de distribuir el agua y llevar el hidrógeno y el oxígeno generado hasta la salida.

En una celda de electrolisis PEM todos estos elementos están mecánicamente soportados por las placas terminales que, junto con los sellos y los elementos de cierre, permiten que las cámaras anódica y catódica

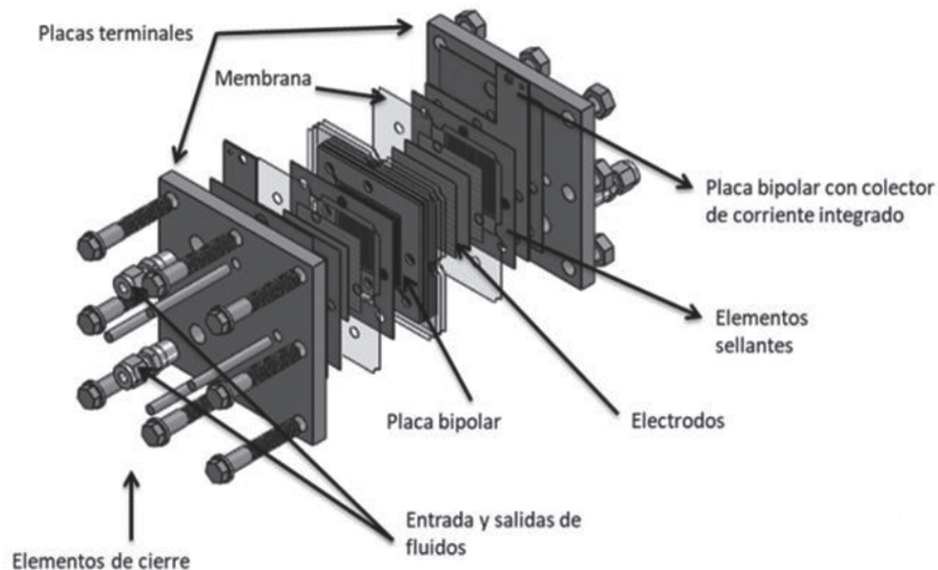
permanezcan separadas, evitando el contacto entre el oxígeno y el hidrógeno generados. (ver figura 4)

Como ocurre con la tecnología alcalina, las celdas van apiladas formando un stack que debe ir acompañado de una serie de sistemas auxiliares (Balance de Planta, BoP) que permitan controlar los parámetros de operación y maximizar su eficiencia haciéndolo funcionar de forma segura. Son los siguientes:

- Sistema de tratamiento y alimentación del agua: este sistema suministra y trata el agua que llega al stack con las condiciones de pureza y conductividad necesarias. Es muy similar al de los electrolizadores alcalinos, aunque en este caso las exigencias son ligeramente superiores.
- Sistema de alimentación eléctrica: este sistema aporta y acondiciona la electricidad que llega al stack para que se lleve a cabo la reacción de electrolisis.
- Sistema de gestión o purificación de los gases: este sistema gestiona la purificación de las corrientes gaseosas de salida del stack, así como su presión.
- Sistema de control y seguridad: este sistema informa sobre el estado del stack a los actuadores del mismo a través de un conjunto de sensores.

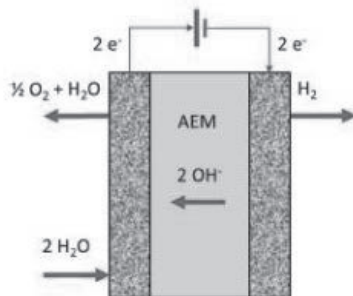
La tecnología PEM es capaz de ofrecer densidades de corriente elevadas, que se traducen en un menor tamaño y peso del stack, lo que junto con su menor balance de planta hace que sea una tecnología más compacta. Además, presenta un excelente comportamiento a variaciones en la potencia a la que trabajan, lo que junto con su amplio rango de

FIGURA 4
CELDA DE ELECTROLISIS (PEM)



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 5
ELECTROLISIS ANIÓNICA (AEM)



Fuente: Elaboración propia

funcionamiento (10-100 %) hace que sea una tecnología fácil de implantar incluso a escalas pequeñas. Su vida útil es similar al caso de la tecnología alcalina: 20 años con cambio de stack a las 80.000 horas. La principal desventaja que presentan es su coste, dado que los materiales de los que se componen este tipo de electrolizadores son más caros, incluyendo metales nobles como el platino. Esto ha hecho que durante mucho tiempo haya sido una tecnología restringida a aplicaciones militares y del sector aeroespacial.

Electrolisis aniónica (aem) ↓

Existe un nuevo proceso de electrolisis, que pretende combinar ambas tecnologías existentes comercialmente en la actualidad, de forma que se potencien las ventajas de ambos sistemas que se han descrito a lo largo del artículo.

En este tipo de proceso se utiliza una membrana aniónica para separar el hidrógeno y el oxígeno del agua, a diferencia de la protónica que se ha descrito para la PEM. Por lo tanto, en lugar de protones son los iones hidroxilo (OH^-) los que difunden al ánodo donde se da la reacción de formación de la molécula de hidrógeno. Este tipo de electrolisis se asemeja también a la electrolisis alcalina, reemplazando los electrolitos por la membrana aniónica, lo que hace el sistema más compacto y con menor resistencia óhmica. (ver figura 5)

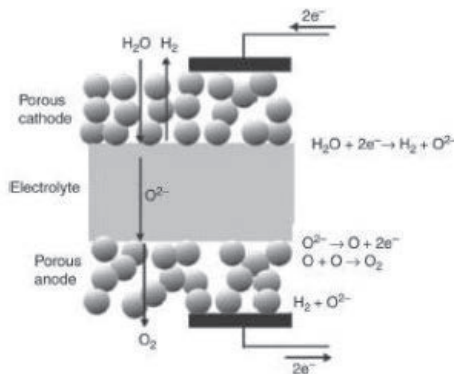
Estos sistemas no están disponibles comercialmente en la actualidad, y se están desarrollando para poder estar disponibles en un plazo medio de tiempo. Hoy se están escalando los mismos, de forma que se pueda desarrollar un sistema completo que permita disponer de un proceso eficiente y con un coste competitivo que posibilite reducir los costes actuales de la producción de hidrógeno.

Electrolisis de óxido sólido (soe) ↓

Este proceso se basa en la reversibilidad de los sistemas de óxido sólido que son sistemas que veremos pueden trabajar en modo electrolizador o pila de combustible. La característica principal de estos sistemas es la temperatura de operación, que se sitúa en un rango de 800-1000°C, lo que posibilita alcanzar unas eficiencias mayores a los sistemas descritos anteriormente.

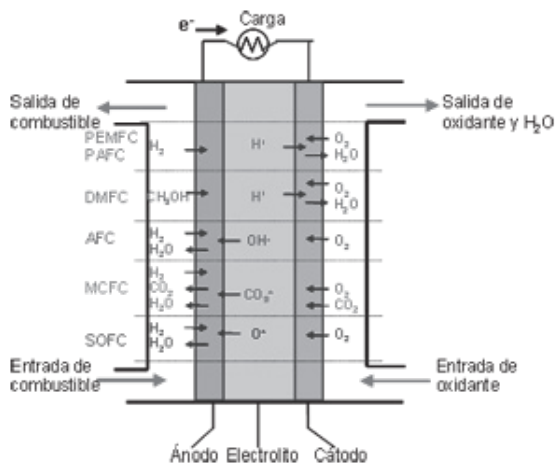
A esta temperatura tan elevada, la alimentación al sistema se realiza en estado gaseoso (vapor de agua). Al entrar en contacto con el cátodo se reduciendo lugar a hidrógeno gas y aniones de oxígeno. Los óxidos sólidos que actúan como electrolito

FIGURA 6
ELECTROLISIS DE ÓXIDO SÓLIDO (SOE)



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 7
PILAS DE COMBUSTIBLE



Fuente: Elaboración propia

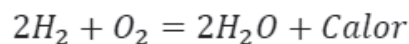
y como separador de las semiceldas, son los que conducen los iones de oxígeno al ánodo, formando el oxígeno gas. (ver figura 6)

El hecho de trabajar a elevadas temperaturas hace que no sea necesario el uso de electrocatalizadores, que son imprescindibles para bajas temperaturas de operación. En el cátodo se utiliza una aleación de metal y cerámico (CERMET) que contiene normalmente níquel y circonio. Como electrolito se utiliza YSZ (Itria estabilizada con Circona). Para el ánodo se utiliza manganita de lantano dopada.

Este sistema no requiere que el agua tenga una gran pureza, lo que la dota de una gran ventaja operativa, aunque su mayor inconveniente en su alta temperatura de funcionamiento, que por otro lado le permite lograr eficiencias mucho mayores que los otros sistemas de electrolisis con el aprovechamiento térmico.

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES DE PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos capaces de transformar directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica y calor. En el caso más simple, están formadas por un electrolito y dos electrodos (ánodo y cátodo) que funcionan de manera muy sencilla. En el caso de que el combustible utilizado sea hidrógeno, la reacción que tiene lugar es la siguiente:



En una pila de combustible se produce directamente energía eléctrica a partir de la energía química de las especies reactivas de modo similar a una batería, aunque a diferencia del caso de las baterías las pilas de combustible no almacenan la energía química en su interior, sino que se almacena en depósitos externos a ellas; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno a diferencia de la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería.

El proceso consiste en la transformación de hidrógeno y oxígeno en agua, generando electricidad. En la superficie de los electrodos tienen lugar las reacciones electroquímicas, donde por un lado el combustible se oxida en el ánodo y por otro lado el oxígeno se reduce en el cátodo, funcionando el electrolito como conductor iónico, aislante eléctrico y de gases.

Las principales ventajas de estos sistemas son: la alta eficiencia en la producción de electricidad, al no tener la limitación de Carnot; el bajo impacto ambiental, que puede ser nulo si operan con hidrógeno, ya que no generan CO₂; la ausencia de ruidos por no tener partes móviles; modularidad y flexibilidad, ya que ofrecen la posibilidad de emplearse para la generación distribuida y cogeneración, así como en el transporte.

Por lo general, las pilas de combustible se componen por una serie de celdas apiladas una tras otras para obtener la potencia deseada. No es necesario que este apilado sea en paralelo (aunque es lo más común), ya que existen casos de apilados de forma tubular concéntrica en las pilas de combustible SOFC. Cada celda puede funcionar de forma independiente y se compone de electrodos, electrolito, y capas catalíticas, (ver figura 7)

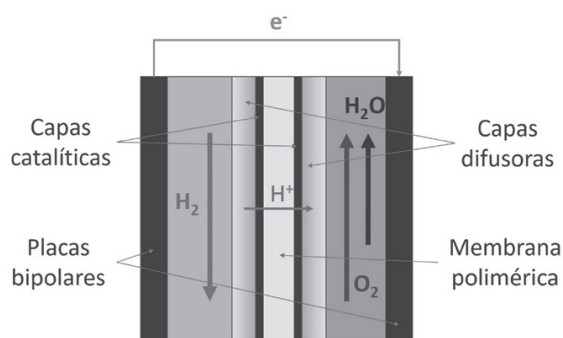
- **Electrodos:** representan el conjunto de ánodo y cátodo. Conectan el circuito eléctrico de tal manera que se puedan intercambiar los electrones de las distintas semi-reacciones necesarias para el funcionamiento de estos dispositivos.
- **Electrolito:** es la sustancia a través de la cual se intercambian los iones para que se produzcan las distintas semi-reacciones en los electrodos. Hay diferentes tipos en función de la tecnología que se emplee, pudiendo ser tanto líquidos como sólidos.

TABLA 1
TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Polímero sólido, a través del cual se intercambian los protones	Líquido. Una solución de hidróxido de potasio	Ácido fosfórico líquido	Compuesto de una mezcla de sales de carbonato fundidas	Óxido sólido
Electrodos	Carbono	Metales de transición	Carbono	Níquel y óxido de níquel	Cermet
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Material del electrodo	Material del electrodo
Interconector	Carbono o metal	Metal	Grafito	Aceros inoxidable o níquel	Níquel, cerámica o acero
Temperatura de operación	40°C-80°C	65°C-220°C	205°C	600°C-700°C	600°C-1000°C
Componentes principales	Carbono	Carbono	Grafito	Aceros inoxidables	Cerámicas

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 8
PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEMFC)



Fuente: Elaboración propia

- **Capas catalíticas:** son las que se encargan de acelerar las semi-reacciones químicas que suceden en las pilas de combustible.

Existen muchos tipos de celdas de combustible que pueden ser clasificadas principalmente en función del tipo de electrolito empleado y de la temperatura de operación. (ver tabla 1)

Pilas de combustible alcalinas (afc) ↓

Este tipo de pilas de combustible fueron las primeras en ser desarrolladas dentro del marco del programa espacial de los USA. En este tipo de diseño el electrolito es líquido, una solución de hidróxido de potasio y pueden usar una gran variedad de metales no muy sofisticados como electrodos. Normalmente operan a temperaturas comprendidas entre 100°C y 250°C. En la actualidad están desarrollándose diseños que operan por debajo de 70°C.

Este tipo de pila de combustible puede alcanzar mejores rendimientos que las PEM. Su principal inconveniente

está relacionado con su sensibilidad a la contaminación por CO₂ y su alto precio, ya que para ser económicamente viables habría de incrementarse su vida media de 8.000 a 40.000 horas.

Pilas de combustible de ácido fosfórico (pafc) ↓

Estas pilas utilizan ácido fosfórico líquido como electrolito y electrodos de carbono poroso que contienen platino como catalizador. Además del empleo del Platino, presentan la desventaja de su gran tamaño y peso debido a que las eficiencias energéticas que presentan son menores que en otros tipos de pilas de combustible. Por lo tanto, se utilizan mayoritariamente en aplicaciones estacionarias o en barcos y submarinos. Son además el segundo grupo más vendido en la actualidad. Como ventaja, presentan una menor sensibilidad al CO.

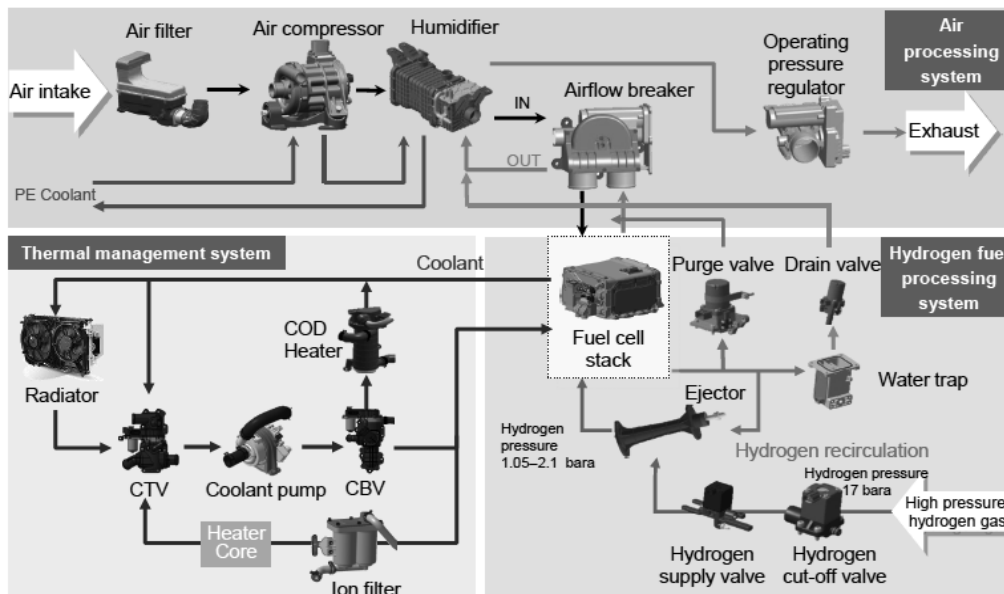
Pilas de combustible de carbonato fundido (mcfc) ↓

Las pilas MCFC son pilas de combustible de alta temperatura (normalmente operan a 600-700°C) y emplean un electrolito compuesto de una mezcla de sales de carbonato fundidas. La alta temperatura de operación hace que presenten como ventaja la posibilidad de eliminar el uso de catalizadores costosos en los electrodos. Además, la eficiencia energética que presentan es alta y por lo tanto no son muy sensibles al CO. La principal desventaja es la baja vida media de los componentes debido a la corrosión. Se usan en aplicaciones estacionarias.

Pilas de combustible de óxido sólido (sofc) ↓

Este tipo de pilas emplea un electrolito sólido y operan a muy alta temperatura 600-1000°C. Debido a las altas temperaturas de operación, los rendimientos energéticos obtenidos son muy altos y se consigue evitar el empleo de materiales costosos como catalizadores. Además, son poco sensibles al CO, pudiendo in-

FIGURA 9
BALANCE DE PLANTA PARA PILA PEMFC



Fuente: Elaboración propia

cluso reformarlo y utilizarlo como combustible debido a su alta temperatura. También permiten el empleo de ciclos combinados para aumentar su eficiencia hasta valores del 85%. Como desventajas, también asociadas a las altas temperaturas de operación, tienen una baja vida media y es necesario refrigerar el sistema lo que hace que se encarezca el balance de planta. También presentan alta sensibilidad al SOx y NOx que puede envenenar los catalizadores más comúnmente empleados.

Pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (pemfc)

El electrolito es un polímero sólido (generalmente NAFION) a través del cual se intercambian los protones. Este tipo de pilas opera a baja temperatura, unos 80°C, lo que hace que sea necesario el empleo de catalizadores muy sofisticados como electrodos, empleando generalmente platino. Como alternativa al empleo de hidrógeno, se plantean diseños en los que las PEM están alimentadas por metanol, llamándose a esta tecnología pilas de combustible de metanol directo.

Los componentes de las celdas que componen este tipo de pilas de combustible son los siguientes, (ver figura 8)

- Membrana polimérica: este componente actúa como electrolito. las más comunes sólo permiten el paso de protones, siendo el catión de hidrógeno (H⁺) el que la traspasa Aunque también existen membranas poliméricas que permiten el paso de aniones.
- Capas catalíticas: este componente se encuentra entre la membrana polimérica y las capas difusoras.

Su función es favorecer la reacción que tiene lugar.

- Capas difusoras: este componente se encarga de transferir los electrones a la placa bipolar, así como de distribuir uniformemente los reactantes alrededor de la membrana polimérica.
- Electrodos: este componente representa el conjunto de las capas catalíticas y las difusoras.
- Placas bipolares: este componente es el que da soporte estructural a las celdas, y en ellas se integran los canales por los que circulan los gases. También se encargan de transferir el calor que se produce en las reacciones electroquímicas al sistema de refrigeración, y conectan eléctricamente el conjunto de celdas apiladas en la pila de combustible.

Para el funcionamiento de este tipo de pila de combustible, el balance de planta necesario suele estar compuesto de sistema de acondicionamiento de aire, sistema de acondicionamiento de hidrógeno, y sistema de acondicionamiento térmico. (ver figura 9)

Sistema de acondicionamiento de aire: este sistema se encarga de filtrar, comprimir, calentar, humidificar y canalizar el aire que requiere la pila de combustible para su funcionamiento.

Sistema de acondicionamiento de hidrógeno: este sistema se encarga de regular la presión y calentar el hidrógeno que alimenta a la pila de combustible.

Sistema de acondicionamiento de aire: este sistema se encarga de evacuar el calor que se produce durante el funcionamiento de la pila de combustible,

con el objetivo de que ésta trabaje en su punto óptimo.

El principal inconveniente que presentan las pilas de combustible PEM son sus bajos rendimientos energéticos. Además, el hecho de que este tipo de pilas de combustible trabajen a baja temperatura hace que presenten velocidades de reacción bajas y que los catalizadores que necesitan para poder operar sean muy costosos y susceptibles de envenenarse en presencia de CO, por lo que el hidrógeno que alimenta a estos dispositivos tiene que tener niveles de pureza muy elevados. Por contrapartida, tienen la ventaja de presentar unos precios competitivos (en relación con el resto de tecnologías de pila de combustible) y una alta potencia específica, lo que las hace posicionarse como una buena alternativa para aplicaciones estacionarias y como la mejor en dispositivos portátiles, teniendo un gran interés en el sector del transporte actualmente. Es por eso que estas son las más empleadas y las que más desarrollo están teniendo.

Actualmente, de entre las distintas opciones descritas anteriormente, la más atractiva desde el punto de vista económico son las pilas de combustible PEM, ya que ofrecen unas altas potencias específicas con unos rendimientos aceptables y una buena durabilidad, además de presentar un balance de planta más sencillo que el resto de tecnologías.

CONCLUSIONES ↓

El hidrógeno se postula como una de las soluciones para lograr la descarbonización del sector industrial, siendo la única solución viable actualmente en algunas aplicaciones como la del transporte pesado por carretera, mar y aire. Tiene además la posibilidad de poder almacenar energía y ser por tanto una alternativa a otros sistemas existentes como las baterías. El hidrógeno llamado «verde» es el que se obtiene a partir del uso de energías renovables libres de emisiones de CO₂. En este artículo se ha dado un repaso a las tecnologías sostenibles que permiten producir y transformar el hidrógeno en energía limpia sin emisiones, consiguiendo cumplir los objetivos climáticos definidos actualmente. En el caso de las tecnologías de producción se ha centrado en la electrólisis como proceso más extendido, cubriendo tanto la baja y media temperatura como la alta temperatura. Respecto a la transformación del hidrógeno generado para la producción de electricidad se han mencionado los distintos tipos de pilas de combustible que existen y en dónde se aplican. En ambos casos se han descritos sus ventajas y desventajas, de forma que se dan pautas para poder seleccionar la mejor solución según la aplicación a la que vaya destinada.