Observatorio Tecnológico del **Hidrógeno**

Producción de hidrógeno renovable por electrólisis:

estado actual y perspectivas de la tecnología

1 de diciembre, 2025

EN COLABORACIÓN:

Observatorio Tecnológico del **Hidrógeno**

Producción de hidrógeno renovable por electrólisis: estado actual y perspectivas de la tecnología

La electrólisis del agua se posiciona como la vía más prometedora de producción de hidrógeno renovable al permitir convertir electricidad renovable en un vector energético versátil, almacenable y libre de emisiones directas.

Las **tecnologías de electrólisis están evolucionando rápidamente**, alcanzado rendimientos que van desde el 60% al 85%.

La **tecnología alcalina (ALK)** se mantiene como la opción más madura y extendida - en 2024 supuso alrededor del 75% de la capacidad de fabricación mundial- con **eficiencias globales en torno al 60-65% (LHV) y purezas de aproximadamente el 99,5%**; seguida de la tecnología de **membrana de intercambio protónico (PEM) con una pureza de hidrógeno más alta (99,99%) y unas eficiencias en torno al 60–70% (LHV).**

Por otra parte, la tecnología de **membrana de intercambio aniónico (AEM)**, todavía en desarrollo, **combina operación a presiones más elevadas que ALK y materiales de menor coste que la PEM**; mientras que la **tecnología de óxido sólido (SOEC)**, en estado pre-comercial, **cuenta con eficiencias de hasta el 85%.**

Más allá de su papel tecnológico, la **electrólisis representa una oportunidad estratégica de soberanía energética** e impulsará una nueva cadena de valor industrial europea, con capacidad de generar empleo cualificado, innovación, liderazgo tecnológico y atracción de inversión extranjera.

Este resumen ejecutivo recoge las principales conclusiones del informe elaborado por el Observatorio Tecnológico del Hidrógeno, y en concreto por sus socios: FHa (Fundación Hidrógeno Aragón), Accelera by Cummins, ARIEMA, CNH2, (Centro Nacional del Hidrógeno) CIDAUT (Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía) CIIAE (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético), CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), EAG (Empresarios Agrupados – GHESA), Enagás, MIBGAS (Mercado Ibérico del Gas) y Navantia Seanergies.

ACCEDE AL INFORME COMPLETO

Fundamentos de la electrólisis: cómo se produce hidrógeno a partir de agua

Los procesos de **electrólisis se llevan a cabo mediante un electrolizador**, que se compone de **dos partes principales**: el **stack** o apilamiento de celdas, que constituye el núcleo donde tiene lugar la reacción de electrólisis, y el **Balance of Plant (BoP),** que corresponde al conjunto de equipos y sistemas auxiliares, que aseguran el adecuado funcionamiento de las celdas y permiten la operación correcta y segura del conjunto.

La **electrólisis del agua** consiste en la **división de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente continua de electricidad**, produciéndose la siguiente reacción global:

$$H_2O\ (liq) \rightarrow H_2\ (gas) + ½\ O_2\ (gas)$$

Esta corriente eléctrica se aplica a través de **dos electrodos** conectados a una fuente de alimentación. El **electrodo positivo**, denominado ánodo, es donde tiene lugar la **semi-reacción de oxidación en la que se genera oxígeno** (Oxygen Evolution Reaction, OER). En el **electrodo negativo**, denominado cátodo, se produce la **semi-reacción de reducción** en la que **se genera hidrógeno** (Hydrogen Evolution Reaction, HER). **La forma concreta en que se desarrollan estas semi-reacciones**, que representan los procesos que tienen lugar de forma separada en cada electrodo, **depende de la tecnología de electrólisis utilizada**.

El **rendimiento del proceso** de electrólisis puede describirse mediante distintas métricas de eficiencia que permiten caracterizarlo desde varios puntos de vista. Entre ellas, destacan la **eficiencia de voltaje, la eficacia de corriente o de Faraday y la eficiencia global**. El análisis conjunto de estos indicadores ofrece una visión integrada del comportamiento del electrolizador y de cómo se aprovecha la energía eléctrica suministrada en la producción de hidrógeno.

La **eficiencia que se obtiene en la operación de un electrolizador** está **condicionada por diversos factores de diseño y de operación**. Entre ellos, se encuentran la temperatura de operación, la densidad de corriente aplicada, los materiales de los electrodos y las características y pureza del electrolito. También resulta determinante la gestión de los gases y de las impurezas, así como las condiciones de operación en escenarios de carga variable, especialmente cuando el sistema se integra con fuentes de energía renovable.

Tecnologías de electrólisis: tipos, evolución y aplicaciones actuales

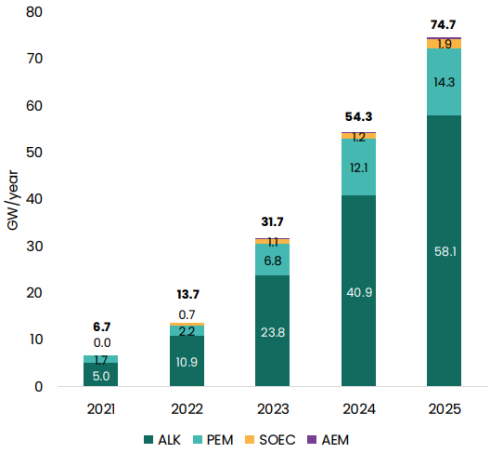
Existen varias tecnologías de electrólisis, cada una con características específicas que las hacen más adecuadas para determinados contextos y usos. Las principales tecnologías de electrólisis del agua son:

- Electrólisis alcalina (ALK)
- Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM)
- Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM)
- Electrólisis de óxido sólido (SOEC)

Las **tecnologías de electrólisis** están **evolucionando rápidamente**, impulsadas por los objetivos de descarbonización y la reducción esperada de costes hacia 2030.

En términos de mercado, **las tecnologías ALK y PEM dominan en la actualidad** debido a su madurez, fiabilidad y disponibilidad a gran escala. Su grado de desarrollo y consolidación industrial las sitúa como las opciones de referencia para los proyectos comerciales de producción de hidrógeno mediante electrólisis, representando la gran mayoría de la capacidad instalada.

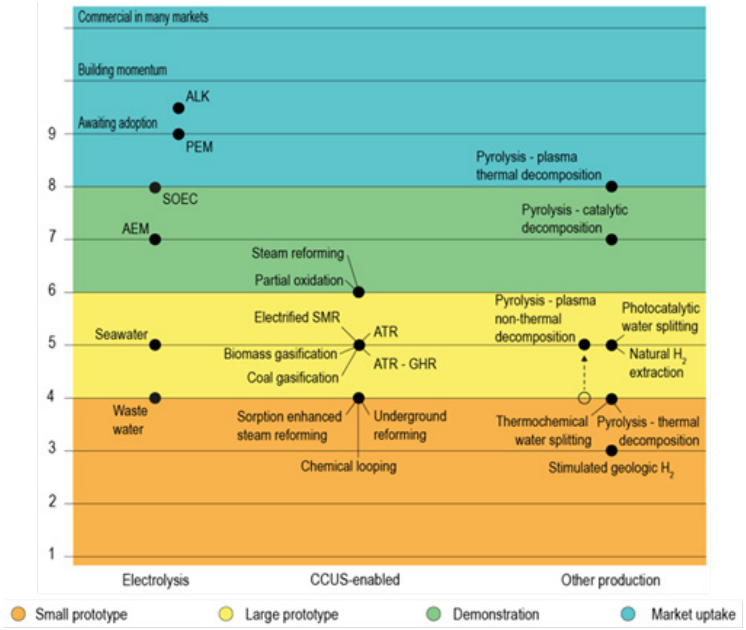
Capacidad de fabricación de electrolizadores a nivel global
(datos de 2025 estimados)



FUENTE: Hydrogen Europe, «Clean Hydrogen Production Pathways,» 2024

Por otro lado, las **tecnologías emergentes, como AEM y SOEC, presentan un potencial atractivo asociado a su mayor eficiencia teórica y a la posibilidad de reducir costes de materiales**. No obstante, se encuentran todavía en fases iniciales de desarrollo o en etapas precomerciales, y deben afrontar retos relevantes en materia de durabilidad, escalabilidad y costes antes de alcanzar una adopción comercial.

TRL de tecnologías de producción de hidrógeno bajo en carbono



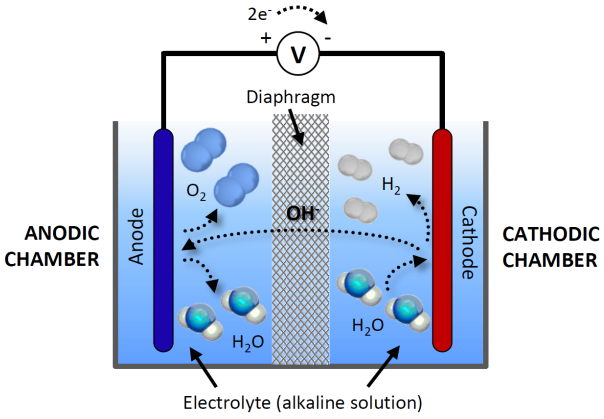
FUENTE: International Energy Agency (IEA), «Global Hydrogen Review 2025»

A continuación, se detallan las principales características de cada tipo de tecnología:

- La **tecnología alcalina (ALK)** se mantiene como la opción más madura y extendida con más de un siglo de desarrollo. Tiene una temperatura de **operación típica a 60–85** °C y normalmente a presión atmosférica, con **eficiencias globales en torno al 60-65% (LHV) y purezas de aproximadamente el 95,5%.**

  Su liderazgo industrial es claro: en 2024 supuso alrededor del 75% de la capacidad de fabricación mundial, copando la mayoría de los **proyectos comerciales a gran escala, que demandan un suministro constante de hidrógeno**.

Esquema general de una celda de electrólisis ALK

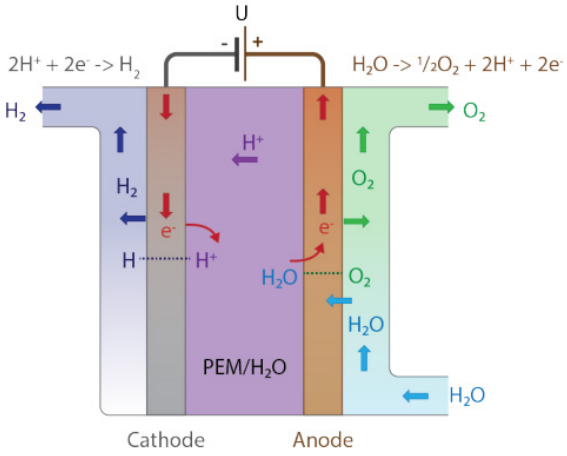


FUENTE: Sustainable Fuel Technologies Handbook., London: Dutta S, Hussain CM. Academic Press, 2021

- La tecnología de **membrana intercambio protónico (PEM)** está ya disponible comercialmente y destaca por su **tamaño compacto, respuesta dinámica y alta pureza del hidrógeno (99,99%).** Tiene una cuota de mercado de en torno al 22% de la fabricación mundial estimada para 2025.

  Sus eficiencias actuales se sitúan en el rango de 60–70% (LHV). Es una alternativa consolidada y flexible para **integración con renovables por su capacidad de funcionamiento en operación dinámica y usos exigentes en pureza.**

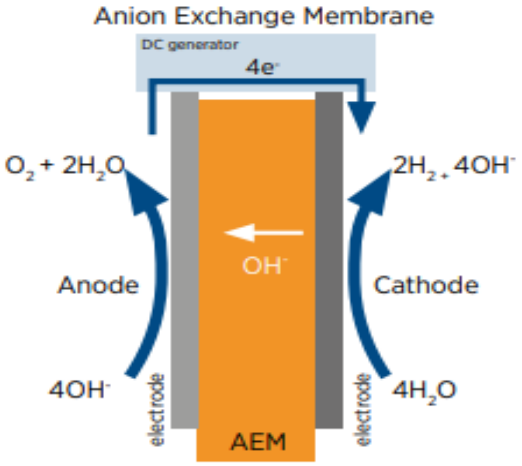
Diagramas de electrólisis PEM



FUENTE: Journal of Power and Energy Engineering, vol. 5, pp. 34-49, 2017

- **La tecnología de membrana de intercambio aniónico (AEM)** emerge como opción, todavía en desarrollo, que **combina operación a presiones más elevadas que ALK y materiales de menor coste que la PEM**, por lo que su CAPEX es potencialmente más competitivo frente a esta. Esta tecnología es idónea para pequeña-mediana escala e integración con renovables de potencia variable y no requiere purezas ultra altas del agua. Su **eficiencia está en el 60-70% (LHV).** Los retos son su durabilidad y escalabilidad, pero el potencial de coste y adaptabilidad la sitúan como candidata relevante de siguiente generación.

Vista esquemática del principio de funcionamiento de la electrólisis AEM



Anode: $4OH^- \leftrightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$
Cathode: $4H_2O + 4e^- \leftrightarrow 2H_2 + 4OH^-$

IRENA, «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020

- **La tecnología de oxido sólido (SOEC) aprovecha la operación a alta temperatura (≈ 600–900 °C)** y el calor residual para reducir consumo eléctrico. Esta tecnología alcanza **eficiencias muy elevadas de hasta el 85% (LHV)**. **Es especialmente atractiva en entornos industriales con vapor disponible y en co-electrólisis**, pero hoy enfrenta barreras de complejidad operativa y sensibilidad a gradientes térmicos y degradación, por lo que su despliegue actual es limitado (≈ 3% de la fabricación estimada a finales de 2025) y orientado a aplicaciones estacionarias con carga estable.

Comparativa entre las tecnologías de electrólisis

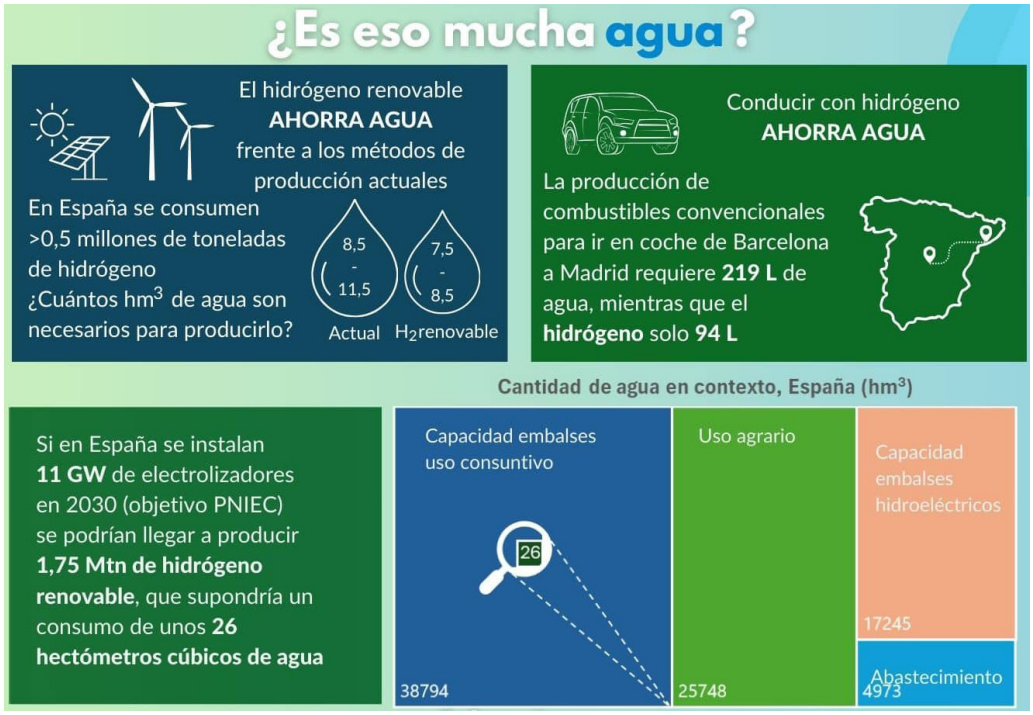
	Estado actual tecnología	TRL	Eficiencia típica	Nº fabricantes identificados	Puntos fuertes	Debilidades	Tendencias de desarrollo
ALK	Comercial	9 - 10	60 - 65%	18	• Vida útil • CAPEX	• Flexibilidad a la variación de carga • Electrolito corrosivo • Presión del H2	• Aumento de la presión de operación • Aumento de la eficiencia
PEM	Comercial	9 - 10	60 - 70%	16	• Flexibilidad a la variación de carga • Diseño compacto • Eficiencia • H2 de alta pureza > 99,9 % • Presión de operación	• CAPEX • Uso de metales preciosos • Uso de PFAS	• Reducción en la utilización de metales preciosos • Aumento de la vida útil • Reducción de PFAS
AEL	Desarrollo	3 - 7	65 - 70%	3	• CAPEX • Baja corrosión electrolito • Diseño compacto • Flexibilidad a la variación de carga	• Madurez de la tecnología • Duración membranas • Vida útil	• Mejora de las membranas • Aumento de la vida útil
SOEC	Pre-comercial	6 - 8	85%	7	• Alta eficiencia si se utiliza calor residual • Posibilidad de co-electrólisis	• Madurez de la tecnología • CAPEX • Integración de la planta • Flexibilidad a la variación de carga	• Reducción de costes • Estrategias de operación e integración con otros equipos • Mejora de materiales

FUENTE: Elaboración propia con datos a diciembre 2025.

Recursos hídricos e integración de la electrólisis en el sistema eléctrico

El **consumo de agua** en los procesos de electrólisis es **reducido y plenamente compatible con otros usos, incluso en escenarios de elevada implantación de la tecnología**. Desde un punto de vista estequiométrico, se requieren aproximadamente 9 litros de agua por cada kg de hidrógeno producido. Si se consideran ineficiencias y necesidades de pretratamiento, el consumo real se sitúa en el rango de 17–22 l/kg de hidrógeno. Según un análisis de la Asociación Española del Hidrógeno (AeH_2), incluso con el desarrollo previsto de proyectos de electrólisis a 2030 en España, el volumen de agua asociado representaría solo en torno al 0,1% del agua destinada a usos agrícolas.

Consumo de agua en la producción de hidrógeno



Fuente: «Asociación Española del Hidrógeno (AeH_2)»

En cuanto a **la integración de electrolizadores en el sistema eléctrico aporta un doble beneficio** más allá de la mera producción de hidrógeno. Por un lado, permite **aprovechar los excedentes de generación renovable** mediante su conversión en energía química almacenada, y por otro, **actúa como un elemento de flexibilidad y estabilidad para la red**, facilitando el acoplamiento entre sistemas energéticos (sector coupling), contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos energéticos.

¿Qué son el coste nivelado del hidrógeno (LCOH) y el índice IBHYX?

El coste nivelado del hidrógeno (LCOH) **se ha consolidado como el indicador clave para comparar el hidrógeno renovable con otras alternativas energéticas y para evaluar la viabilidad de proyectos bajo distintos escenarios.** En la práctica, el LCOH permite aglutinar en un único indicador el impacto combinado de las decisiones tecnológicas, económicas y operativas asociadas a la producción de hidrógeno.

El LCOH viene **determinado esencialmente por varios factores**: el precio **de la electricidad, que suele ser el componente dominante**; la inversión en CAPEX del electrolizador y del Balance of Plant (BoP); los factores de utilización, ligados a las horas de operación anuales; la eficiencia del sistema; y los costes fijos y variables de operación y mantenimiento.

En clave nacional, cabe destacar que MIBGAS ha desarrollado el Índice IBHYX, que se establece como la referencia de coste nivelado de producción de hidrógeno renovable de origen no biológico (RFNBO) en la Península Ibérica.

Bases de datos para el análisis de la evolución del mercado de hidrógeno

El mercado cuenta actualmente con múltiples bases de datos de referencia que **permiten disponer de información estructurada sobre los principales proyectos** y sus características más relevantes.

Entre estas bases de datos destacan la del European Hydrogen Observatory, el Hydrogen Tracker de la IEA, el Hydrogen Infrastructure Map y el censo de proyectos de la AeH_2, que facilitan el análisis comparativo y el seguimiento del despliegue del hidrógeno renovable.

España, potencial hub de producción y exportación de hidrógeno renovable

España cuenta con **ventajas estructurales singulares** —abundancia de recursos renovables, una red gasista desarrollada y una sólida capacidad industrial— que la sitúan como **candidata natural para convertirse en un hub de producción y exportación de hidrógeno renovable en el sur de Europa**. Estas fortalezas le permiten posicionarse de forma diferencial en la economía del hidrógeno, tanto a nivel comunitario como internacional.

El desarrollo de este vector energético se enfrenta a varios **retos a corto y medio plazo**. Entre las prioridades se encuentran: acelerar **la reducción de costes y la escalabilidad tecnológica, desplegar infraestructuras de transporte, almacenamiento y distribución adaptadas al hidrógeno, y establecer marcos regulatorios claros, estables y armonizados** que impulsen la inversión y aporten certidumbre al mercado. A ello se suma la necesidad de favorecer la formación y capacitación en nuevas competencias profesionales vinculadas al hidrógeno, como condición imprescindible para sostener el crecimiento del sector.

Más allá de su dimensión puramente tecnológica, **la electrólisis representa una oportunidad estratégica en términos de soberanía energética**: contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, favorece la estabilización del sistema eléctrico y permite avanzar hacia un modelo industrial descarbonizado y competitivo.

En este contexto, **el despliegue de la electrólisis está llamado a impulsar una nueva cadena de valor industrial europea**, con capacidad para generar empleo cualificado, fomentar la innovación, reforzar el liderazgo tecnológico y atraer inversión extranjera.

Observatorio Tecnológico del **Hidrógeno**