Electrocatalizadores en la era del hidrógeno verde

De la transición energética a la interfase electrodo-electrolito

Elena Pastor Tejera

Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Instituto Universitario de Materiales y Nanotecnología, Universidad de La Laguna

Discurso de Ingreso como Académica de Número de la Real Academia Canaria de Ciencias

Sr. Presidente de la Real Academia Canaria de Ciencias
Sres. Académicos
Queridos familiares, amigos y compañeros
Señoras y señores

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la Real Academia Canaria de las Ciencias por proponer mi nombramiento como Académica de Número, que se hace efectivo a través de este Discurso de Ingreso. Es un orgullo y un honor poder pertenecer a esta institución, que al igual que el resto de Reales Academias, tiene la vocación de constituir uno de los más altos exponentes del conocimiento y de contribuir a su difusión y puesta al servicio de la sociedad.

Pero este nombramiento supone también una responsabilidad y un compromiso que asumo con ilusión y con vocación de trabajo. Considero especialmente importante acercar la ciencia a la sociedad y hacerla partícipe de las investigaciones y de los avances científicos que, con gran esfuerzo y muchas veces de forma poco visible, tratan de dar respuesta tanto a los grandes desafíos globales como a aquellos que afectan de manera más cercana a nuestro entorno. Las Academias pueden y deben desempeñar un papel relevante como lugar de encuentro entre el conocimiento científico y la sociedad, contribuyendo a divulgar la ciencia, fomentar el pensamiento crítico y poner en valor la investigación que se desarrolla en nuestras instituciones.

Entre estos compromisos quisiera destacar también el de contribuir a hacer más visible el papel de la mujer en la ciencia. Aunque los avances alcanzados durante las últimas décadas son indudables, todavía persisten diferencias en determinados ámbitos y, especialmente, en el acceso a puestos de mayor responsabilidad y reconocimiento científico. Dar visibilidad a las mujeres que desarrollan su actividad en la ciencia, reconocer sus aportaciones y ofrecer referentes a las nuevas generaciones constituye una tarea en la que instituciones como esta Academia pueden desempeñar un papel importante. Espero poder contribuir también, desde mi incorporación a esta institución, a este objetivo.

Recibo, por tanto, este nombramiento no solo como un reconocimiento, que agradezco profundamente, sino también como una oportunidad para seguir trabajando al servicio de la ciencia y su difusión, y al de nuestra sociedad, y muy especialmente de la sociedad canaria.

La elección del tema de este discurso responde, fundamentalmente, a tres razones: en primer lugar, abordar un problema global, como es la necesidad de avanzar hacia una transición energética que

dé respuesta a los problemas medioambientales derivados del actual modelo energético; en segundo lugar, la especial relevancia que este proceso puede tener para Canarias; y, finalmente, su estrecha relación con la actividad científica desarrollada en los últimos años en mi grupo de investigación.

La creciente preocupación por la contaminación ambiental y, especialmente, por el cambio climático asociado al uso intensivo de los combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda de un modelo energético más sostenible. Conceptos como transición energética, energías renovables, descarbonización o eficiencia energética han trascendido ya el ámbito científico y forman parte del debate cotidiano. En este contexto, el hidrógeno verde ha adquirido una especial relevancia por su estrecha conexión con el aprovechamiento y almacenamiento de las energías renovables.

Detrás de la aparente simplicidad de utilizar electricidad renovable para producir hidrógeno a partir del agua y recuperar posteriormente su energía cuando sea necesaria, se encuentran, sin embargo, importantes retos científicos y tecnológicos. Y es aquí donde la electroquímica y, más concretamente, la electrocatálisis, tienen mucho que decir. La eficiencia de los dispositivos electroquímicos involucrados en las tecnologías del hidrógeno depende, en buena medida, de las reacciones que tienen lugar en la interfase electrodo-electrolito y de los materiales utilizados para catalizarlas. Conseguir que estos procesos se produzcan con menores pérdidas energéticas y empleando materiales más abundantes, menos costosos y más duraderos constituye todavía uno de los grandes desafíos para el desarrollo de estas tecnologías.

Por otra parte, la transición energética adquiere una dimensión especialmente relevante en Canarias. Nuestra condición de territorio insular, la elevada dependencia energética del exterior y de los combustibles fósiles y, al mismo tiempo, la disponibilidad de importantes recursos solares y eólicos, entre otros, hacen de las islas un escenario privilegiado para avanzar hacia un modelo energético basado en fuentes renovables. La fragmentación de los sistemas eléctricos insulares y las limitaciones para intercambiar energía con grandes redes continentales plantean dificultades, pero también convierten a Canarias en un verdadero laboratorio para el desarrollo, demostración e integración de energías renovables y sistemas de almacenamiento. En este contexto, el hidrógeno verde puede desempeñar un papel relevante tanto en el aprovechamiento de excedentes renovables como en la descarbonización de sectores de difícil electrificación, particularmente aquellos vinculados al transporte marítimo y a la actividad portuaria.

Existe, finalmente, una tercera razón, más directamente relacionada con la investigación que he desarrollado. Durante los últimos años, buena parte de los estudios que hemos llevado a cabo en el grupo de investigación de Ciencia de Superficies y Electrocatálisis (CISEL), se han centrado en el diseño y estudio de electrocatalizadores para electrolizadores y pilas de combustible, incluso antes de que se produjera el actual auge del hidrógeno verde. Por ello, quisiera aprovechar este discurso para situar estas investigaciones en el contexto energético actual y presentar el pequeño granito de arena que, desde nuestro ámbito de trabajo, hayamos podido aportar a la implementación de estas tecnologías y a los retos que plantea la transición hacia un modelo energético más sostenible.

Con estas tres motivaciones como punto de partida, paso a continuación a desarrollar el tema que he elegido para este Discurso de Ingreso: «**Electrocatalizadores en la era del hidrógeno verde**».

1. Hidrógeno verde y transición energética

El sistema energético que ha sustentado el desarrollo económico e industrial durante los dos últimos siglos se ha basado, en gran medida, en el uso de combustibles fósiles. Este modelo ha permitido disponer de energía abundante y ha contribuido de manera decisiva al progreso económico y social, pero también ha provocado un incremento sostenido de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) concluyó en su informe de síntesis de 2023, que las actividades humanas, principalmente a través de dichas emisiones, han causado inequívocamente el calentamiento global y que la temperatura media de la superficie terrestre alcanzara aproximadamente 1,1 °C por encima del nivel de 1850-1900 durante el período 2011-2020 (IPCC, 2023). Limitar el calentamiento exige, por tanto, una reducción profunda y sostenida de las emisiones y avanzar hacia un sistema energético progresivamente descarbonizado.

Esta transformación constituye la **transición energética**. No se limita a sustituir carbón, petróleo y gas natural por fuentes renovables, sino que implica actuar simultáneamente sobre la producción y el consumo de energía: aumentar la eficiencia, electrificar los usos finales siempre que sea técnica y económicamente razonable, desplegar generación renovable, reforzar las redes y desarrollar sistemas de flexibilidad y almacenamiento. La Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) señala que la expansión de las tecnologías energéticas limpias está modificando rápidamente el sistema energético mundial, aunque el ritmo de despliegue debe acelerarse para alcanzar los objetivos climáticos y de seguridad energética (IEA, 2024).

La energía solar fotovoltaica y la eólica están llamadas a desempeñar un papel central en este proceso, pero presentan una característica que condiciona su integración a gran escala: su producción es variable y depende de la disponibilidad del recurso renovable, por lo que no siempre coincide temporalmente con la demanda. Un sistema con una elevada penetración de estas fuentes necesita combinar redes más flexibles, interconexiones, gestión de la demanda y diferentes tecnologías de almacenamiento. Las baterías constituyen una solución especialmente eficiente para numerosas aplicaciones eléctricas, pero no resuelven por sí solas todas las necesidades de almacenamiento ni permiten descarbonizar fácilmente determinados procesos industriales y modos de transporte. Surge así la necesidad de convertir parte de la electricidad renovable en **vectores energéticos** o materias primas que puedan almacenarse, transportarse y utilizarse posteriormente.

Es en este contexto donde debe situarse el hidrógeno renovable, habitualmente denominado **hidrógeno verde**. El hidrógeno no es una fuente primaria de energía, sino un vector energético: para producirlo es necesario aportar energía, pero una vez obtenido puede almacenarse, transportarse, emplearse como materia prima industrial o transformarse de nuevo en otras formas de energía. Cuando se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad renovable, permite trasladar energía procedente del sistema eléctrico hacia sectores en los que la electrificación directa presenta mayores dificultades. La IEA considera que el hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados pueden desempeñar un papel relevante precisamente en sectores de difícil

descarbonización, como determinadas actividades de la industria pesada y el transporte de larga distancia (IEA, 2025).

Conviene, sin embargo, situar esta expectativa en su dimensión actual. La producción mundial de hidrógeno alcanzó casi 100 millones de toneladas en 2024, pero menos del 1 % procedió de tecnologías de bajas emisiones; la mayor parte continúa obteniéndose a partir de combustibles fósiles. Además, los nuevos usos del hidrógeno representaron menos del 1 % de la demanda mundial, que sigue concentrada en aplicaciones tradicionales como el refino y la industria química (IEA, 2025). Por tanto, el reto no consiste simplemente en producir más hidrógeno, sino en sustituir progresivamente el hidrógeno de origen fósil por alternativas de bajas emisiones y desarrollar nuevos usos allí donde este vector aporte una ventaja real frente a otras opciones de descarbonización.

2. Los colores del hidrógeno

Los denominados «**colores del hidrógeno**» no describen moléculas químicamente diferentes: en todos los casos el producto es H_2. Se trata de una nomenclatura divulgativa que distingue rutas de producción según la materia prima, la fuente energética y el tratamiento de las emisiones (Figura 1). Aunque resulta útil para introducir el tema, las políticas actuales tienden a sustituir progresivamente esta clasificación por criterios cuantitativos de intensidad de emisiones y por definiciones regulatorias precisas. (IEA, 2024).

Se definen los siguientes colores (entre otros):

- Hidrógeno verde o renovable: producido principalmente por electrólisis del agua con electricidad renovable. Es la opción central de las políticas europeas de hidrógeno renovable.
- Hidrógeno gris: producido normalmente a partir de gas natural mediante reformado con vapor, sin captura del CO_2 generado.
- Hidrógeno azul: producido a partir de combustibles fósiles incorporando captura, utilización o almacenamiento de carbono. Su impacto depende de la tasa real de captura y de las emisiones de la cadena del combustible.
- Hidrógeno negro o marrón: asociado a la gasificación de carbón o lignito, con elevada intensidad de emisiones si no existe captura.
- Hidrógeno rosa: denominación habitual para el producido por electrólisis empleando electricidad nuclear.

Figura 1. Principales rutas de producción y «colores» del hidrógeno. Fuente: adaptada de CIC Energigune.

3. Producción y costes del hidrógeno verde

La producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis del agua puede realizarse con distintas tecnologías. Los **electrolizadores** alcalinos constituyen la opción más madura y ampliamente desplegada; los de membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés) presentan una respuesta dinámica especialmente adecuada para integrarse con generación eólica y fotovoltaica variable, aunque mantienen una mayor dependencia de materiales críticos; los electrolizadores de células de óxido sólido (SOEC, por sus siglas en inglés) trabajan a alta temperatura y pueden alcanzar eficiencias elevadas cuando existe una fuente térmica apropiada; y los sistemas de membrana de intercambio aniónico (AEM, por sus siglas en inglés) continúan en una fase de madurez inferior. En 2024 la capacidad mundial instalada de electrólisis de agua alcanzó aproximadamente 2 GW, con China concentrando alrededor del 65 % de la capacidad instalada y de los proyectos con decisión final de inversión (FID, por sus siglas en inglés). Esta cantidad ya se ha incrementado a 3 GW según datos de julio de 2025. (IEA, 2025).

La IEA señala que el hidrógeno renovable continúa siendo, en general, más caro que el producido a partir de combustibles fósiles sin captura. En 2024, producir hidrógeno renovable era aproximadamente entre 1,5 y 6 veces más costoso, dependiendo de la región y de las condiciones del proyecto. En un escenario de despliegue compatible con cero emisiones netas, la IEA estima

para 2030 costes del orden de 2-9 USD/kg H_2; sin embargo, el despliegue más lento de lo previsto, la inflación y la reducción de los precios de los combustibles fósiles han ampliado recientemente la brecha de costes en numerosos mercados (IEA, 2024; IEA, 2025). Sin embargo, factores geopolíticos, como la guerra de Irán y el cierre del estrecho de Ormuz, afectan sensiblemente al coste de los combustibles fósiles, lo que puede suponer un impulso en la apuesta por el H_2 como vector energético.

El coste final depende de manera decisiva del precio de la electricidad renovable, pero también del factor de utilización, la eficiencia, el coste de capital, la vida útil y el balance de planta. En 2024, fabricar e instalar un electrolizador fuera de China suponía, aproximadamente, 2.000-2.600 USD/kW, frente a 600-1.200 USD/kW para equipos fabricados e instalados en China. No obstante, más de la mitad de la inversión total de numerosos proyectos corresponde a ingeniería, adquisición, construcción y contingencias, de modo que abaratar únicamente el *stack* (conjunto de monoceldas electroquímicas que constituyen el dispositivo final) no garantiza por sí solo un hidrógeno competitivo (IEA, 2025).

A estos factores económicos se añade un reto directamente relacionado con la **electrocatálisis**: la dependencia de materias primas críticas. En particular, los sistemas PEM requieren catalizadores basados en metales del grupo del platino, con especial relevancia del iridio para la reacción de evolución de oxígeno. La reducción de la carga de estos metales, su reciclaje y el desarrollo de materiales alternativos más abundantes constituyen objetivos prioritarios de investigación. Así, el problema del coste del hidrógeno verde conduce de forma natural desde la escala energética e industrial hacia la escala de los materiales y de los sitios activos del electrocatalizador.

4. Política europea del hidrógeno

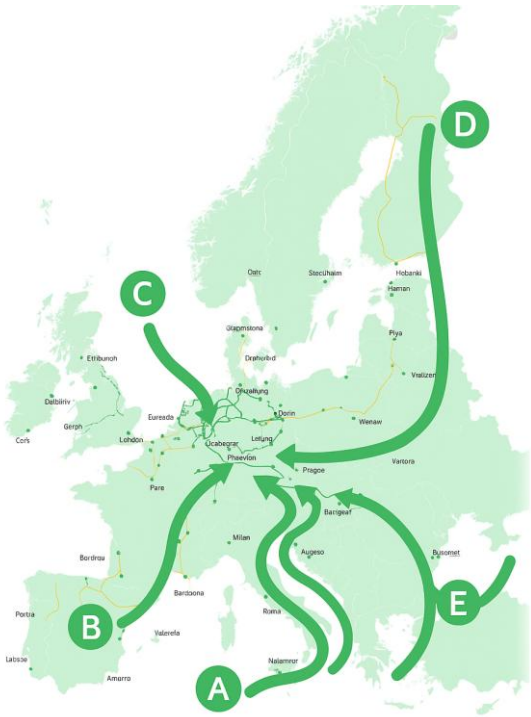
La política europea del hidrógeno debe entenderse como parte de una estrategia más amplia de neutralidad climática, seguridad energética y competitividad industrial. El **Pacto Verde Europeo** estableció la neutralidad climática para 2050 como horizonte general; posteriormente, **Fit for 55** reforzó el marco regulatorio para 2030 y **REPowerEU**, adoptado tras la crisis energética desencadenada por la invasión rusa de Ucrania (febrero de 2022), incorporó una dimensión explícita de autonomía energética. En este contexto, REPowerEU mantiene como referencia para 2030 la ambición de producir 10 millones de toneladas anuales de hidrógeno renovable dentro de la Unión Europea e importar otros 10 millones de toneladas (Comisión Europea, 2024).

La estrategia ha evolucionado desde una primera fase centrada en demostrar y desplegar electrolizadores hacia la creación de un verdadero mercado europeo del hidrógeno. El paquete legislativo de 2024 sobre los mercados del hidrógeno y los gases descarbonizados establece reglas para el transporte, el acceso a las redes, la planificación y la coordinación transfronteriza. Paralelamente, instrumentos como el **Banco Europeo del Hidrógeno** tratan de reducir la diferencia entre el coste de producción del hidrógeno renovable y el precio que los consumidores pueden asumir, favoreciendo la aparición de demanda y contratos de suministro (Comisión Europea/CINEA, 2024).

El ritmo real de despliegue, sin embargo, es más lento que el sugerido por los primeros escenarios. La demanda mundial de hidrógeno alcanzó casi 100 millones de toneladas en 2024, pero el hidrógeno de bajas emisiones continuó representando menos del 1 %. Para 2030, los proyectos que ya están operativos, en construcción o han alcanzado decisión final de inversión permitirían superar 4 millones de toneladas anuales de producción de bajas emisiones; otros proyectos podrían elevar esta cifra, pero una parte importante de la cartera anunciada presenta retrasos, incertidumbre de demanda o dificultades de financiación. Esta diferencia entre objetivos políticos y proyectos materializados, constituye uno de los principales retos de la economía del hidrógeno en la segunda mitad de esta década (IEA, 2025).

4.1. European Hydrogen Backbone y los corredores europeos

La **European Hydrogen Backbone** (**EHB**), o «**columna vertebral europea del hidrógeno**», representa la visión de una futura red paneuropea capaz de conectar zonas de producción, centros industriales de demanda, almacenamientos, puertos y puntos de importación (Figura 2). La propuesta combina la reconversión de parte de la actual infraestructura de gas natural con nuevas tuberías específicamente destinadas al H_2. Más que una única obra, la EHB debe entenderse como un marco de coordinación de infraestructuras nacionales y transfronterizas destinado a favorecer seguridad de suministro, competencia y formación de un mercado europeo integrado.



Corredores europeos del hidrógeno y la EHB

- Corredor A – Norte de África y Europa meridional
- Corredor B – Suroeste de Europa y Norte de África
- Corredor C – Mar del Norte
- Corredor D – Regiones nórdicas y bálticas
- Corredor E – Europa oriental y sudoriental

Figura 2. Columna vertebral europea del hidrógeno y sus corredores.

Como esquema general, se puede organizar esta infraestructura en cinco grandes corredores: Norte de África-Europa meridional; Suroeste de Europa-Norte de África; Mar del Norte; regiones nórdicas y bálticas; y Europa oriental y sudoriental, aunque cada uno de ellos se han ido redefiniendo a medida que ha ido madurando el mercado. Para España, el corredor del suroeste (el corredor B) y en concreto el **proyecto H2Med**, son especialmente relevantes porque conectan la Península Ibérica con Francia y, potencialmente, con los grandes centros de consumo del centro y noroeste de Europa.

Estas infraestructuras pueden transformar la posición de España: de país importador de combustibles fósiles a potencial productor y nodo de tránsito de moléculas renovables. Sin embargo, el desarrollo de tuberías debe acompasarse con la demanda real. La IEA advierte de que los proyectos orientados a exportación presentan mayores dificultades para alcanzar decisiones finales de inversión cuando no existen compradores asegurados.

4.2. Valles del hidrógeno

Los **valles del hidrógeno** son ecosistemas territoriales en los que se integran, dentro de una misma región, producción, almacenamiento, distribución y diversos consumidores de hidrógeno. Su objetivo es crear demanda y oferta de manera coordinada, reducir necesidades iniciales de transporte a larga distancia y favorecer economías de escala. Pueden integrar industria, movilidad pesada, puertos, producción de derivados y generación renovable. (CHP, 2025).

La **Clean Hydrogen Partnership** (**CHP**) mantiene en 2025 una *Hydrogen Valleys Facility* destinada a proporcionar asistencia técnica, financiera, jurídica y de gobernanza para que nuevos proyectos europeos alcancen la decisión final de inversión. En España, la **Orden TED/801/2024** estableció las bases del programa de incentivos para clústeres o valles de hidrógeno renovable. La resolución definitiva de junio de 2025 asignó 1.223 millones de euros a siete grandes proyectos situados en Aragón, Andalucía, Castilla y León, Cataluña y Galicia. Estos proyectos incorporan producción y consumo de hidrógeno y, en varios casos, combustibles derivados como e-SAF, e-metanol o amoniaco renovable. (CHP, 2025; MITECO, 2024-2025).

5. Política española: del objetivo de 4 GW a 12 GW de electrólisis

España dispone de condiciones favorables para el hidrógeno renovable por su recurso solar y eólico, su tejido industrial, sus puertos y su posición geográfica entre el norte de África y Europa. La **Hoja de Ruta del Hidrógeno** de 2020 fijó inicialmente una meta de 4 GW de electrolizadores en 2030. La actualización del **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima** (PNIEC 2023-2030), aprobada en septiembre de 2024, elevó sustancialmente esta ambición hasta cerca de 12 GW de electrolizadores para 2030, junto con 76 GW de fotovoltaica, 62 GW de eólica y 22,5 GW de almacenamiento. (MITECO, 2024).

El despliegue se apoya en los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (PERTE ERHA), el Plan de Recuperación y diferentes líneas de ayuda para la cadena de valor, grandes

electrolizadores, movilidad, investigación y valles del hidrógeno. La estrategia española intenta combinar producción competitiva con demanda industrial cercana, evitando que el desarrollo se limite a exportar hidrógeno sin generar cadena de valor local. (MITECO, 2024-2025).

El cambio de escala desde 4 a 12 GW ilustra la creciente importancia concedida al hidrógeno en la planificación energética española, pero también aumenta la exigencia de desarrollar, simultáneamente, generación renovable adicional, redes eléctricas, agua, infraestructura de transporte, almacenamiento, demanda industrial y mecanismos de certificación. La prioridad tecnológica debe ser utilizar el hidrógeno allí donde aporte mayor valor climático y económico.

6. Repercusión y oportunidades para Canarias

Canarias presenta un caso singular dentro de la economía española del hidrógeno. Sus sistemas eléctricos insulares, la elevada dependencia histórica de combustibles fósiles importados, la disponibilidad de recursos solares y eólicos, el potencial de la eólica marina y la importancia del transporte marítimo, aéreo y turístico, convierten al archipiélago en un territorio de interés para demostrar sistemas integrados de energía renovable e hidrógeno. Al mismo tiempo, la insularidad, la limitada dimensión de cada sistema eléctrico, la disponibilidad de suelo y agua y los costes logísticos obligan a evaluar cuidadosamente cada aplicación. (Gobierno de Canarias, Estrategia Canaria del Hidrógeno Verde).

La **Estrategia Canaria del Hidrógeno Verde** plantea utilizar este vector especialmente en subsectores de difícil descarbonización, transporte colectivo y pesado por carretera, transporte marítimo y aéreo interinsular, aplicaciones estacionarias y almacenamiento a gran escala. En los escenarios de la estrategia, la producción necesaria para 2030 se estima en unas 45.130 t H_2/año para el conjunto del archipiélago, asociada a unos 427 MW de electrolizadores. Para 2040, el escenario aumenta hasta aproximadamente 219.564 t H_2/año y 2.177 MW de electrólisis. Tenerife y Gran Canaria concentran la mayor parte de la capacidad prevista: 170 MW de electrólisis en cada isla en el escenario 2030. (Gobierno de Canarias, Estrategia Canaria del Hidrógeno Verde).

La repercusión potencial es especialmente importante en el transporte. La estrategia estima para 2030 una demanda de 31.032 t H_2/año para movilidad terrestre, 3.433 t H_2/año para transporte aéreo interinsular y 6.834 t H_2/año para transporte marítimo interinsular. Estas cifras son escenarios de planificación, no consumos actuales, y dependen de la madurez de las tecnologías y de la disponibilidad de combustibles derivados. (Gobierno de Canarias, Estrategia Canaria del Hidrógeno Verde).

Canarias ya dispone de experiencias demostrativas. En marzo de 2024 entró en servicio la primera guagua de pila de combustible alimentada con hidrógeno renovable del archipiélago, utilizando H_2 producido en la biorrefinería **Biogreenfinery** del Instituto Tecnológico de Canarias en Pozo Izquierdo. Asimismo, PLOCAN desarrolla el **proyecto H2Verde**, una planta piloto de electrólisis integrada con renovables y almacenamiento en un entorno marino. La autorización ambiental de 2024 describe una instalación experimental de 50 kW que utiliza agua desalada y energías renovables. En 2025 el Gobierno de Canarias informó de que la instalación había producido

sus primeros kilogramos de hidrógeno renovable en condiciones *offshore* reales. (Gobierno de Canarias, 2024-2025).

Otro ejemplo es **RESH2PORT**, proyecto de producción de hidrógeno verde vinculado al transporte colectivo por carretera en el Puerto de Las Palmas, cuyo informe de impacto ambiental fue publicado en octubre de 2024. Estos proyectos muestran que el papel inicial de Canarias puede ser particularmente relevante como laboratorio de sistemas insulares, puertos, movilidad pesada, eólica marina y acoplamiento entre desalación, renovables, baterías e hidrógeno. (Gobierno de Canarias, 2024).

La oportunidad económica incluye creación de capacidades de I+D, formación especializada, servicios portuarios y marítimos, ingeniería y potencial producción de combustibles sintéticos. Sin embargo, el hidrógeno no debe considerarse una solución universal para el sistema energético canario. En usos eléctricos ordinarios, la electrificación directa y las baterías suelen presentar una eficiencia superior. El H_2 cobra mayor sentido cuando se necesita almacenamiento de larga duración, combustible para usos difíciles de electrificar o materia prima para combustibles sintéticos destinados a aviación y navegación.

7. De la economía del hidrógeno al problema electrocatalítico

El recorrido anterior permite situar el problema científico. Las estrategias europeas, los corredores de transporte o los valles del hidrógeno describen la escala territorial e industrial de la transición, pero no resuelven por sí mismos las limitaciones de los dispositivos electroquímicos. Para producir hidrógeno renovable es necesario impulsar la electrólisis del agua; para transformar posteriormente su energía química en electricidad pueden emplearse pilas de combustible. En ambos casos, las pérdidas asociadas a la cinética de las reacciones de electrodo condicionan el rendimiento global.

En un electrolizador, la **reacción de evolución de hidrógeno** (**HER**, por sus siglas en inglés) y, especialmente, la reacción de evolución de oxígeno (OER, por sus siglas en inglés) requieren electrocatalizadores activos y estables. En una pila de combustible, la oxidación del hidrógeno es comparativamente rápida, mientras que la **reacción de reducción de oxígeno** (**ORR**, por sus siglas en inglés) constituye uno de los principales cuellos de botella cinéticos. Los catalizadores de referencia continúan dependiendo en muchos casos del Pt, Ir y otros metales del grupo del platino. Reducir su carga, sustituirlos cuando sea posible por elementos abundantes y prolongar la vida útil del dispositivo son, por tanto, objetivos científicos directamente vinculados a la viabilidad de la economía del hidrógeno.

En este cambio de escala - desde las infraestructuras energéticas hasta los sitios activos de un catalizador - aparece la **investigación en electrocatálisis** como determinante para la implantación de la economía del hidrógeno. La actividad de los electrocatalizadores no depende únicamente de la composición química: intervienen el tamaño y la dispersión de las partículas, la estructura electrónica, los defectos, la interacción con el soporte, la porosidad, la conductividad y la

accesibilidad de los centros activos. De ahí el interés por materiales carbonosos avanzados, grafeno y derivados, heteroátomos dopantes, carburos, MXenes, redes metal-orgánicas (MOF, por sus siglas en inglés) y materiales compuestos.

8. Electrolizadores y pilas de combustible: dispositivos clave

Los electrolizadores y las pilas de combustible ocupan posiciones complementarias en la cadena del hidrógeno (Figura 3). El **electrolizador** transforma electricidad y agua en hidrógeno y oxígeno. Cuando la electricidad procede de fuentes renovables y se cumplen los criterios regulatorios correspondientes, el H_2 obtenido puede calificarse como renovable. El electrolizador es, por tanto, la interfaz que permite trasladar energía desde el sistema eléctrico hacia la economía molecular: industria, almacenamiento, movilidad y combustibles derivados. (IEA, 2024-2025; CHP, 2024).

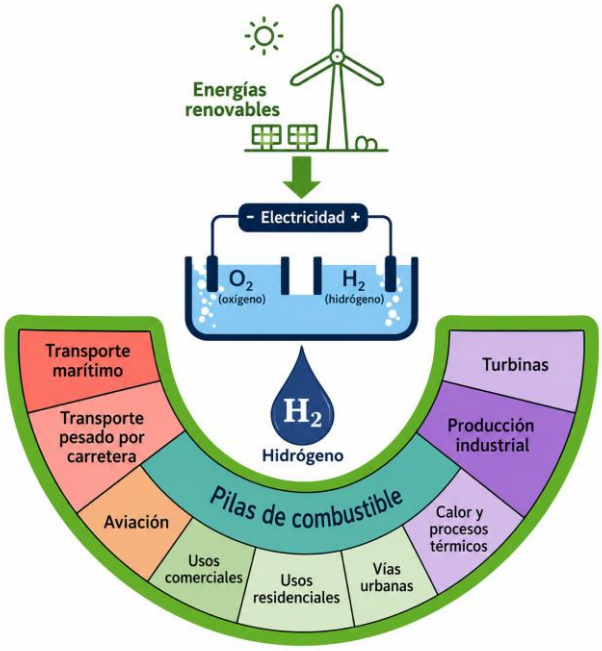


Figura 3. Esquema conceptual de la relación entre las energías renovables, los dispositivos electroquímicos y las aplicaciones del hidrógeno. Fuente: adaptado de CIC Energigune.

La expansión de la electrólisis es una condición necesaria para que el hidrógeno verde alcance escala industrial. La capacidad mundial instalada para producción de hidrógeno alcanzó 1,4 GW a finales de 2023. La cartera de proyectos anunciados es mucho mayor, pero la IEA subraya que solo una fracción ha alcanzado una decisión final de inversión o construcción. La economía del hidrógeno dependerá, por ello, no solo de fabricar más electrolizadores, sino de conseguir factores de utilización adecuados, electricidad renovable competitiva, durabilidad, eficiencia y reducción del uso de materiales críticos. (IEA, 2024-2025).

Las **pilas de combustible** realizan la conversión inversa desde el punto de vista energético: transforman electroquímicamente la energía química del hidrógeno en electricidad, produciendo agua como producto principal en el caso de emplear H_2 puro. Pueden emplearse en movilidad pesada, sistemas estacionarios, respaldo energético y aplicaciones en las que se valore una autonomía elevada o un repostaje rápido. En sistemas PEM, tanto electrolizadores como pilas dependen de membranas, capas catalíticas y materiales capaces de operar con alta eficiencia y estabilidad. (CHP, 2024; U.S. DOE, 2024-2026).

Esta complementariedad permite visualizar una economía del hidrógeno completa. La electricidad renovable alimenta el electrolizador; el H_2 se comprime, almacena, transporta o transforma en derivados; finalmente puede consumirse como reactivo industrial, combustible o reconvertirse en electricidad mediante una pila de combustible. El reto consiste en reservar esta cadena - más compleja y menos eficiente que el uso directo de electricidad - para aquellos sectores en los que su capacidad de almacenamiento, transporte o transformación química justifique las pérdidas y el coste adicional.

En territorios como Canarias, esta relación es particularmente ilustrativa: los electrolizadores pueden integrar excedentes renovables y generar combustible para aplicaciones insulares difíciles de electrificar, mientras que las pilas de combustible pueden convertir ese hidrógeno en electricidad para movilidad o aplicaciones estacionarias. Los proyectos demostrativos ya existentes permiten estudiar en condiciones reales cómo deben combinarse renovables, desalación, baterías, electrólisis, almacenamiento y consumo. De este modo, electrolizadores y pilas de combustible constituyen los dos extremos electroquímicos de una cadena que puede contribuir a la descarbonización siempre que se integre de forma selectiva, eficiente y económicamente racional.

9. Retos tecnológicos y papel de los electrocatalizadores

El desarrollo de la economía del hidrógeno no depende únicamente de disponer de electricidad renovable e infraestructura. Electrolizadores y pilas de combustible deben reducir simultáneamente coste, consumo de materiales críticos y degradación, y aumentar eficiencia, potencia específica, flexibilidad operativa y capacidad de fabricación a gran escala. La actualización de 2024 de la **Agenda Estratégica de Investigación e Innovación** de la CHP mantiene precisamente estas variables entre las prioridades europeas de I+D, y el estudio europeo sobre industrialización de las tecnologías del hidrógeno publicado en octubre de 2024 identifica como obstáculos la dependencia de materias primas críticas, la capacidad de fabricación todavía limitada y determinadas barreras regulatorias. (CHP, 2024).

9.1. Retos de los electrolizadores

- **Coste de inversión y fabricación**. El coste del sistema instalado continúa siendo elevado, especialmente fuera de China, y una parte considerable de la inversión corresponde al balance de planta, electrónica de potencia, compresión, tratamiento de agua, ingeniería e instalación.

Por ello, la reducción del precio del *stack* debe acompañarse de diseños modulares, automatización y economías de escala en toda la instalación (IEA, 2025; CHP, 2024).

- **Eficiencia y consumo eléctrico.** La electricidad es normalmente el componente dominante del coste variable del hidrógeno renovable. Mejorar la eficiencia de las celdas, disminuir las pérdidas óhmicas y los sobrepotenciales y operar con factores de utilización adecuados son condiciones esenciales para reducir el coste por kilogramo de H_2. (IEA, 2024-2025).
- **Durabilidad bajo operación renovable variable.** Los electrolizadores conectados a energía solar y eólica deben soportar arranques, paradas y cambios rápidos de carga sin acelerar la degradación de membranas, electrodos, catalizadores y capas porosas. Este reto es particularmente relevante para los dispositivos PEM, cuyo atractivo reside precisamente en su elevada respuesta dinámica. (CHP, 2024).
- **Materias primas críticas.** Los sistemas PEM dependen de catalizadores y componentes que pueden contener iridio y otros metales del grupo del platino. La disponibilidad limitada de estos materiales puede convertirse en un cuello de botella si la electrólisis se despliega a escala de decenas o cientos de gigavatios. Las líneas actuales de investigación buscan reducir drásticamente las cargas de metales críticos, aumentar su reciclabilidad y desarrollar materiales alternativos. (CHP, 2024; **proyecto SUSTAINCELL**).
- **Escalado industrial y cadena de suministro.** Europa mantiene capacidades destacadas en I+D y fabricación, pero necesita aumentar el volumen de producción, estandarizar componentes, mejorar la circularidad y reducir dependencias exteriores. El estudio de la CHP de 2024 señala la escala manufacturera y la seguridad de la cadena de suministro como factores centrales para la competitividad europea. (CHP, 2024).
- **Calidad y gestión del agua.** La electrólisis requiere agua con calidad adecuada, además de sistemas de purificación, circulación y gestión térmica. En territorios con escasez hídrica, como muchas islas, la integración con desalación puede ser necesaria. El consumo directo de agua no suele dominar el coste del H_2, pero su disponibilidad, tratamiento y gestión ambiental deben incorporarse desde la planificación del proyecto.

9.2. Retos de las pilas de combustible

- **Coste y utilización de platino.** En las pilas de combustible PEM (**PEMFC**), el Pt continúa siendo un catalizador de referencia, especialmente para la ORR, cuya cinética es lenta. Reducir la carga de Pt manteniendo actividad y estabilidad es esencial para disminuir costes y exposición a materias primas críticas. El **proyecto europeo IMMORTAL** ha demostrado cargas de aproximadamente 0,31 g Pt/kW en cada MEA (acoplamiento membrana-electrodo que constituye el corazón de una pila de combustible) para aplicaciones pesadas, mostrando avances importantes, pero también la necesidad de equilibrar actividad y estabilidad. (CHP, 2024).
- **Durabilidad.** La degradación de membranas, catalizadores, soportes carbonosos y capas de difusión limita la vida útil. En aplicaciones pesadas las exigencias son particularmente elevadas; los programas de I+D europeos y estadounidenses plantean decenas de miles de horas de operación. El proyecto IMMORTAL estableció alrededor de un 10 % de pérdida de potencia en

30.000 h para determinadas MEA, mientras que los objetivos de desarrollo siguen exigiendo mejoras en estabilidad durante ciclos reales. (CHP, 2024; U.S. DOE).

- **Actividad y estabilidad de la ORR**. La reducción de oxígeno en el cátodo es una de las principales fuentes de pérdidas de eficiencia. Es necesario desarrollar catalizadores con potenciales de inicio más favorables, alta selectividad hacia la vía de cuatro electrones y baja producción de H_2O_2, manteniendo estabilidad a largo plazo. Este reto conecta directamente con los materiales grafénicos, dopados y combinados con metales no nobles.
- **Gestión de agua y calor.** Una PEMFC necesita mantener una hidratación adecuada de la membrana: un exceso de agua puede inundar los electrodos y limitar el transporte de gases, mientras que una deshidratación excesiva reduce la conductividad protónica. El diseño térmico y la gestión del agua son, por tanto, esenciales para alcanzar alta potencia y vida útil.
- **Pureza y suministro del hidrógeno.** Contaminantes como el CO y determinadas especies de azufre pueden envenenar los catalizadores. Además, el coste final de la electricidad producida por una pila depende del precio del H_2, de su compresión, almacenamiento y distribución. Por ello, el reto de las pilas no puede separarse del desarrollo de una infraestructura de suministro fiable y competitiva.
- **Fabricación a gran escala y reciclaje.** El paso desde prototipos a producción industrial exige procesos rápidos y reproducibles para membranas, electrodos, placas bipolares y ensamblaje de *stacks*, junto con estrategias de reutilización y recuperación de Pt y otros materiales. La CHP considera la sostenibilidad de la cadena de suministro y la fabricación escalable prioridades explícitas de la investigación europea (CHP, 2024).

En conjunto, electrolizadores y pilas de combustible comparten un reto científico fundamental: sustituir o reducir materiales nobles y críticos sin sacrificar actividad, selectividad ni durabilidad. De ahí la importancia de la electrocatálisis y del diseño de nuevos materiales (materiales grafénicos dopados, carburos, MXenes, MOF y composites), entre otros. La investigación en catalizadores no es, por tanto, un aspecto periférico, sino una condición para que la economía del hidrógeno pueda escalar de forma sostenible y competitiva.

10. Contribuciones al desarrollo de electrocatalizadores para tecnologías del hidrógeno

Una vez establecido el papel de los electrolizadores y de las pilas de combustible en la economía del hidrógeno, la cuestión central se desplaza hacia los materiales que hacen posibles sus reacciones electroquímicas. Las contribuciones que se presentan a continuación se organizan, por tanto, no como una relación cronológica de trabajos, sino atendiendo a los problemas científicos abordados: el diseño del material catalítico, la modificación de su estructura electrónica, la identificación de los centros activos, la relación entre estructura y actividad, y el esclarecimiento de los mecanismos de reacción. El hilo conductor es la búsqueda de electrocatalizadores con menor dependencia de metales nobles para dos procesos especialmente relevantes: la reacción de reducción de oxígeno en pilas de combustible (ORR) y la reacción de evolución de hidrógeno en electrolizadores (HER).

En los dispositivos con membrana de electrolito polimérico (PEM), los electrocatalizadores deben combinar una elevada actividad con estabilidad, conductividad y una adecuada accesibilidad de los reactivos a los centros activos. Cuando se emplean nanopartículas, su dispersión sobre el soporte, el área superficial disponible, la distribución de tamaños de poro y la interacción entre la fase activa y el soporte condicionan el comportamiento electroquímico (Figura 4). Estas consideraciones condujeron al estudio de soportes carbonosos avanzados (Figura 5) y, de manera particular, de materiales grafénicos. (Rivera et al., 2017; Fajardo et al., 2023, 2024).

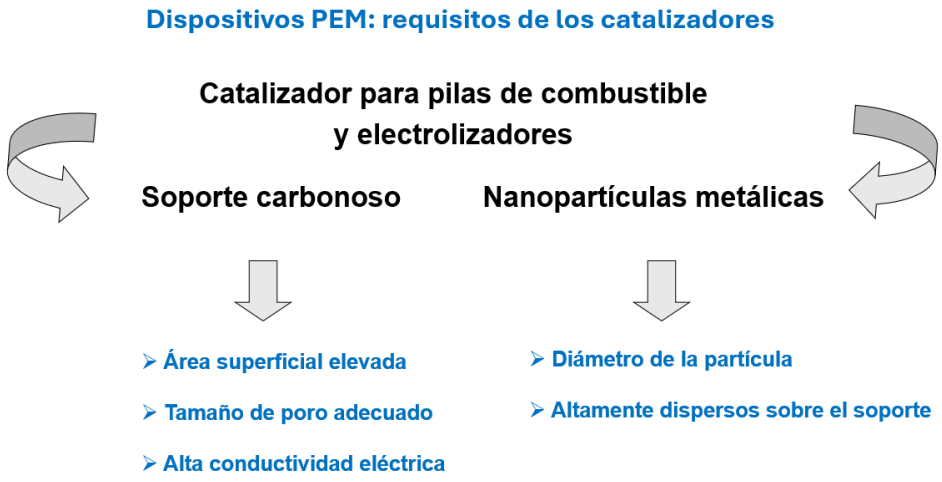


Figura 4. Requisitos de los catalizadores para dispositivos PEM.

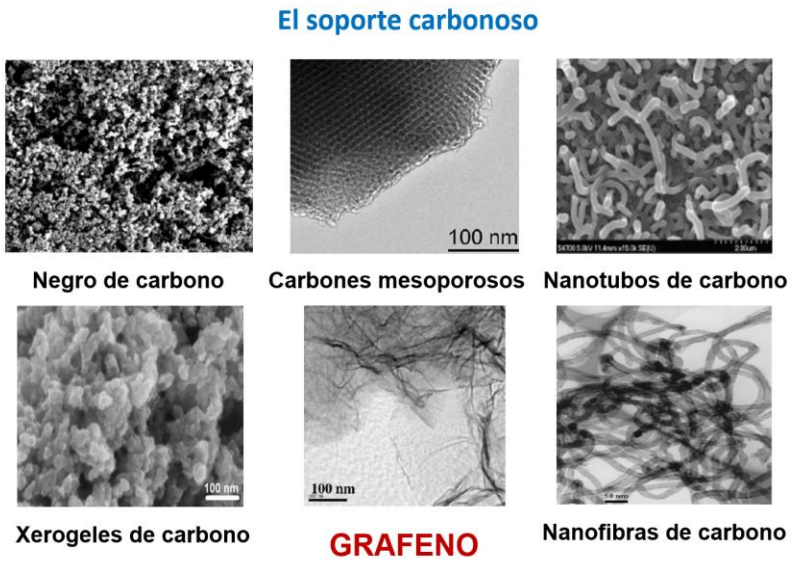


Figura 5. Principales familias de soportes carbonosos consideradas para electrocatálisis.

10.1. Materiales grafénicos (GM): del soporte al electrocatalizador

El grafeno presenta una elevada conductividad eléctrica y una gran área superficial teórica, características atractivas para su utilización como soporte. Sin embargo, la interacción de una lámina ideal de grafeno con especies metálicas puede ser débil. La introducción de grupos funcionales, defectos y heteroátomos permite modificar su química superficial y su estructura electrónica. Por ello, las investigaciones se extendieron desde el grafeno hacia el óxido de grafeno (GO) y el óxido de grafeno reducido (rGO) (Figura 6), y posteriormente, hacia materiales dopados con nitrógeno y azufre, para los que se han usado distintas estrategias de reducción y dopado, incluidas rutas con citrato, glucosa, cafeína, dimetilsulfóxido, tiourea y tiocianato como agentes reductores (Figura 7). (Rivera et al., 2017).

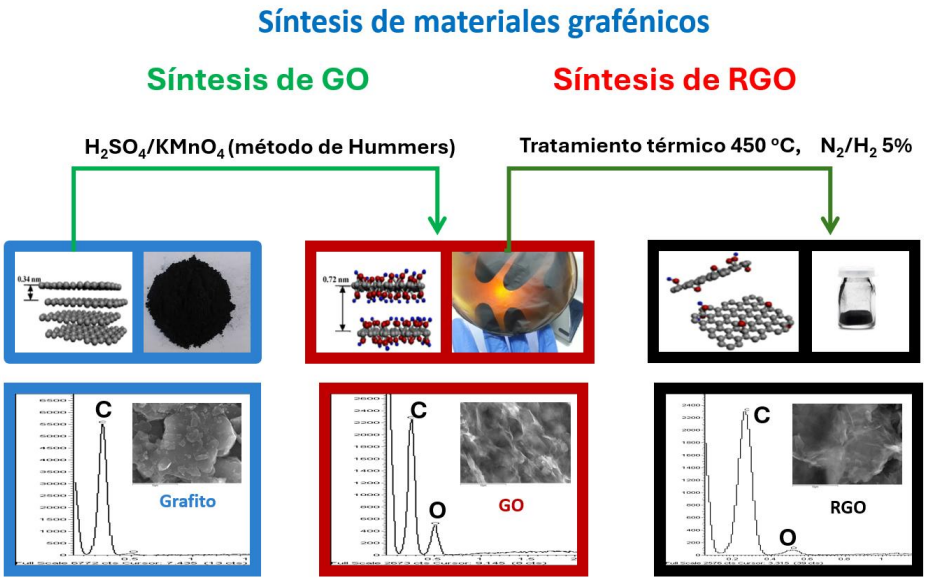


Figura 6. Síntesis de GO y RGO

El interés de estos materiales no se limita a su función como soporte. Los defectos y los heteroátomos pueden actuar como centros activos o modificar la distribución de carga de los átomos de carbono próximos, abriendo la posibilidad de utilizar los materiales grafénicos como electrocatalizadores o cocatalizadores.

.

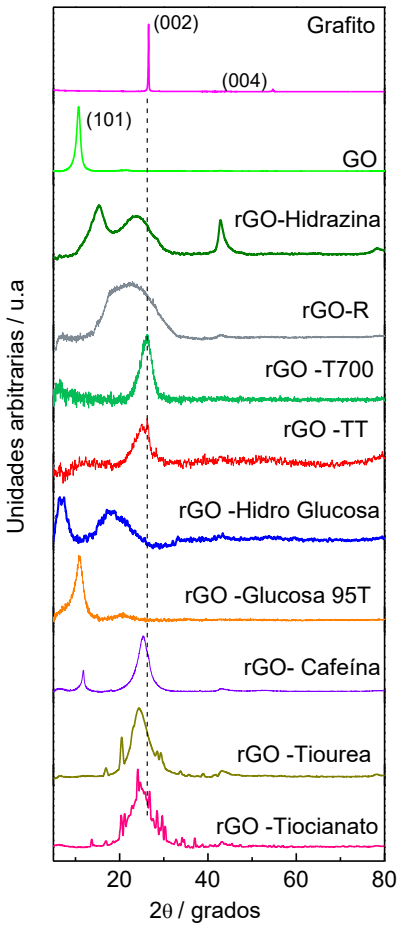


Figura 7. Difractogramas de rayos X para RGO obtenidos con diferentes agentes reductores, mostrando que presentan diferentes características estructurales.

10.2. Reacción de reducción de oxígeno (ORR): materiales grafénicos dopados

La ORR es la reacción que más condiciona la eficiencia de las PEMFC debido a su cinética lenta y a la posibilidad de seguir rutas con diferente número de electrones (Figura 8). La evaluación de los materiales grafénicos obtenidos mediante diferentes procedimientos de reducción y dopado mostraron actividad electrocatalítica en medio alcalino y evidenciaron que la naturaleza de los grupos incorporados al material modifica la respuesta frente a la ORR (Figura 9). (Rivera et al., 2017).

La utilización del **electrodo de disco-anillo rotatorio** (**RRDE**) permitió registrar las curvas de polarización que aportan información sobre la formación de peróxido de hidrógeno, aspecto esencial para distinguir entre una reducción preferente por cuatro electrones (reducción a agua) y rutas parciales de dos electrones (reducción a agua oxigenada). Este dispositivo consta de dos electrodos de trabajo: uno en forma de disco en el que se registra la corriente asociada a la ORR y otro en forma de anillo en el que se detecta el agua oxigenada que se produce, de forma que se puede establecer la eficiencia hacia estos procesos. El objetivo dejó así de ser únicamente aumentar la corriente catalítica: pasó a incluir también el control de la selectividad y la comprensión del mecanismo (Figura 9). (Rivera et al., 2017).

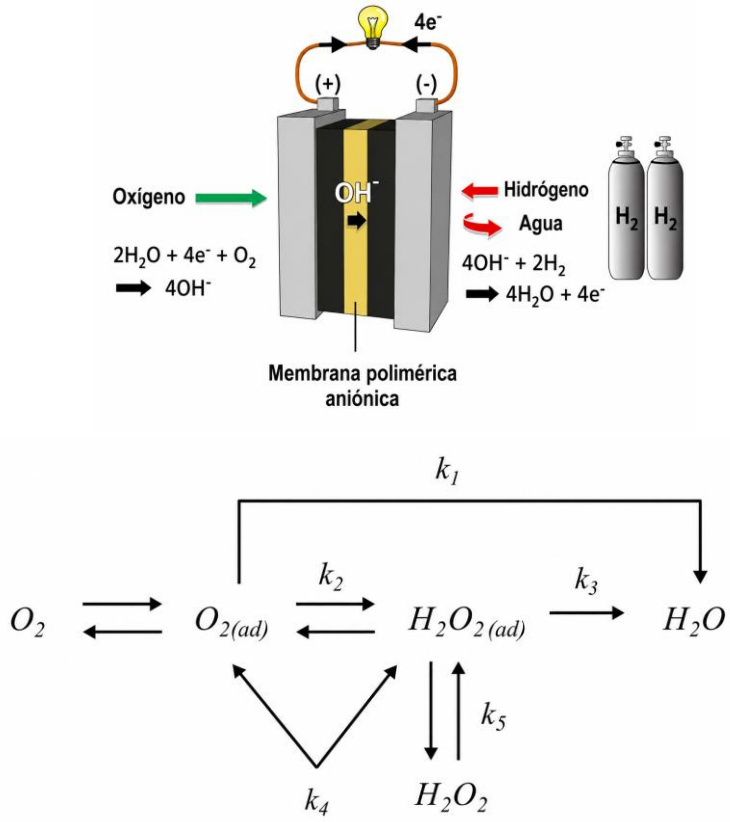


Figura 8. Pila de combustible PEM con las reacciones que tienen lugar en sus electrodos (arriba) y mecanismo general para la ORR en medio ácido (abajo) con la vía de 4 electrones a H_2O y de 2 electrones a H_2O_2.

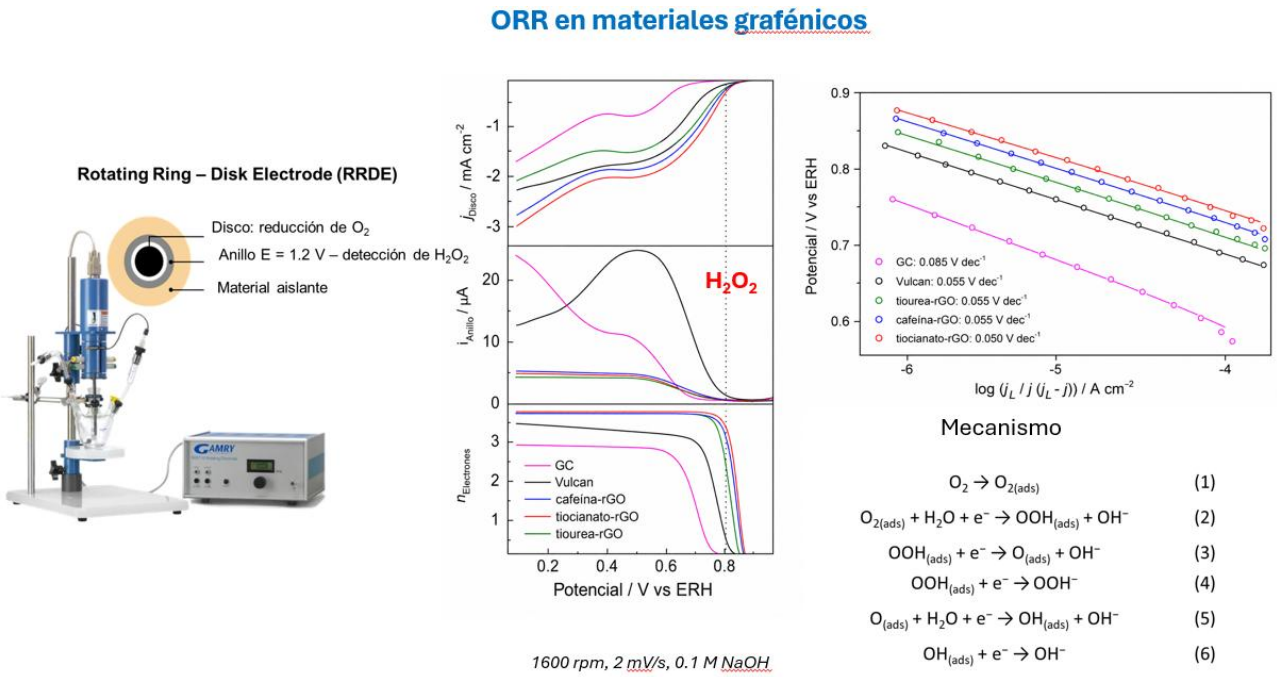


Figura 9. Estudio de la ORR en materiales grafénicos mediante técnicas hidrodinámicas en medio básico. (Rivera et al., 2017).

10.3. Incorporación de metales no nobles y redes metal-orgánicas

Una segunda estrategia para mejorar la actividad de estos materiales consiste en combinar los materiales grafénicos dopados con metales no nobles. Así, el material dopado simultáneamente con azufre y nitrógeno (SN-rGO) se ha utilizado como soporte con el propósito de aprovechar simultáneamente los centros generados por los heteroátomos y la fase metálica. Los resultados recogidos con el RRDE muestran un efecto sinérgico entre ambos componentes, con mejoras de la respuesta electrocatalítica respecto a los materiales grafénicos sin metal. (Fajardo et al., 2023; Fajardo et al., 2024).

Esta aproximación se amplió mediante la incorporación de redes metal-orgánicas (MOF, por sus siglas en inglés). En particular, se estudiaron sistemas basados en ZIF-67 (compuesto por iones cobalto y 2-metilimidazolato) combinados con SN-rGO y modificados con manganeso (Figura 10).

La caracterización mediante **técnicas espectroscópicas y microscópicas** (espectroscopía Raman, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido con microanálisis y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X), permitió relacionar composición y estructura con la actividad electroquímica. Se pudo establecer que el manganeso se encontraba como MnO_2 y que su presencia induce la formación de Co_3O_4 (Figura 11), ilustrando cómo la incorporación de un segundo metal puede modificar la naturaleza de las fases activas y mejorar la respuesta electroquímica (Figura 12). (Fajardo et al., 2024).

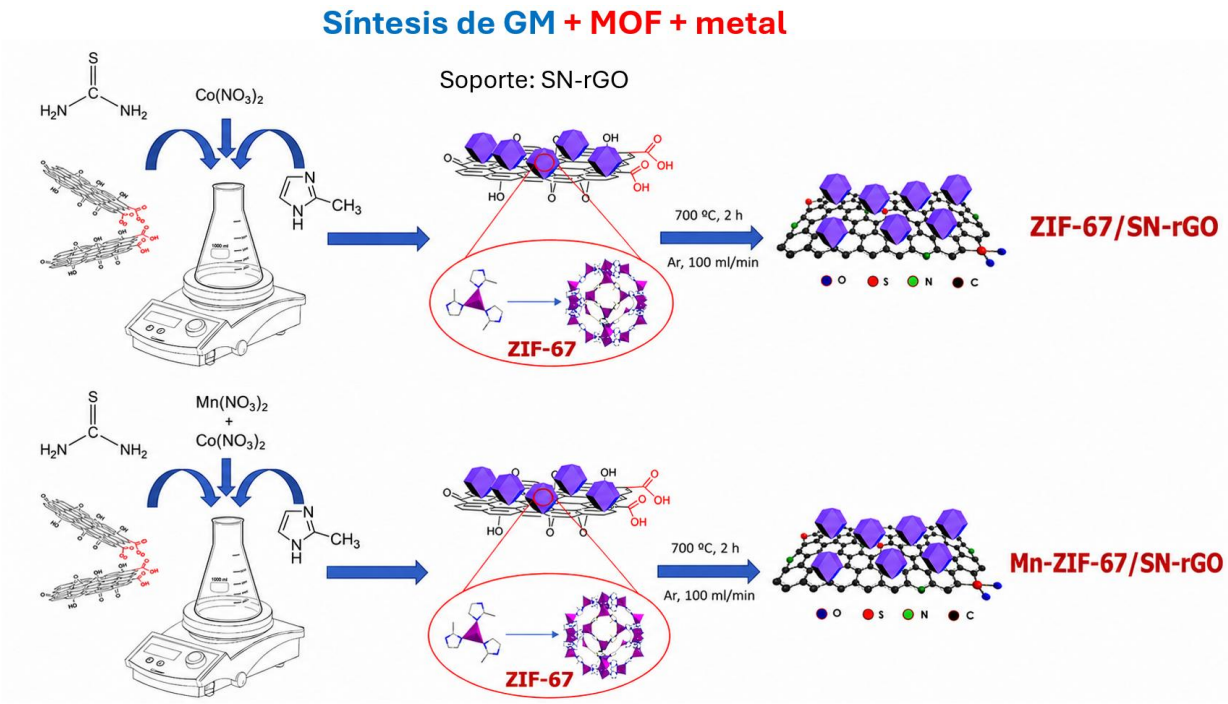


Figura 10. Síntesis de composites ZIF-67 y SN-rGO con y sin Mn.

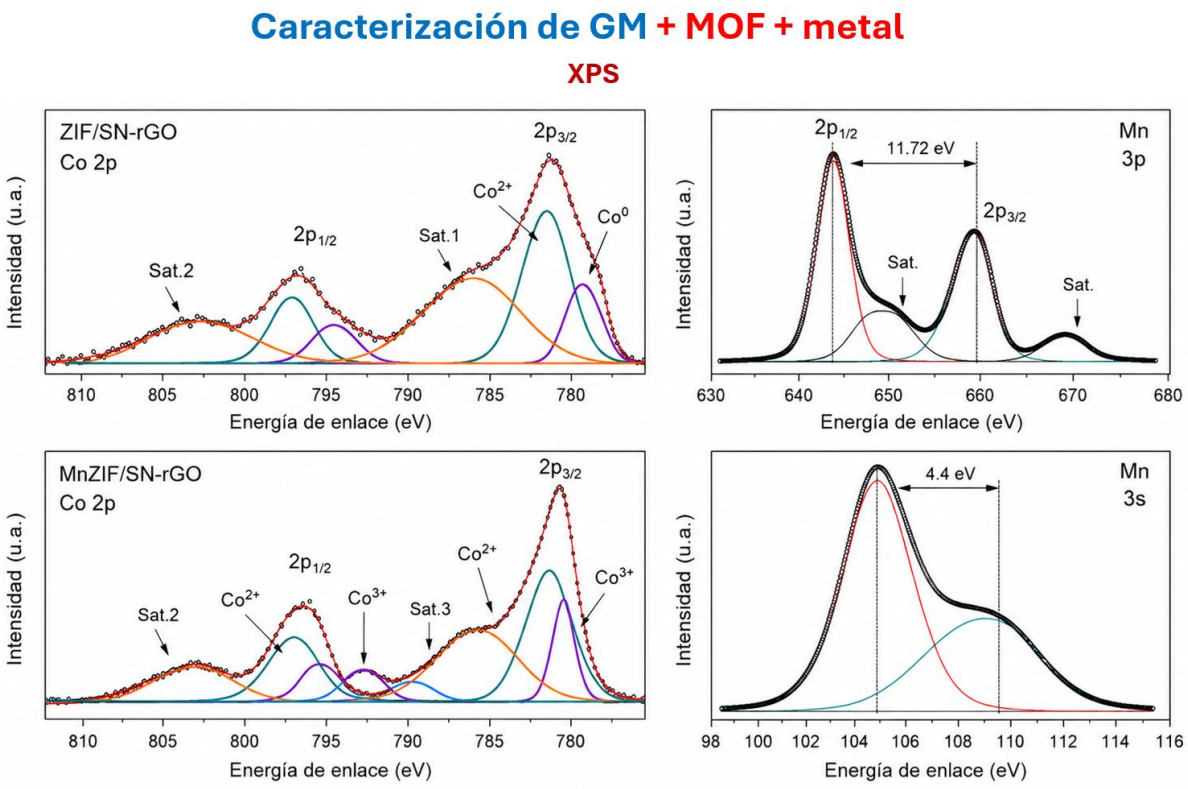


Figura 11. Caracterización por espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) mostrando la presencia de MnO_2 y la aparición de Co_3O_4 al añadir Mn al ZIF/SN-rGO. (Fajardo et al., 2024).

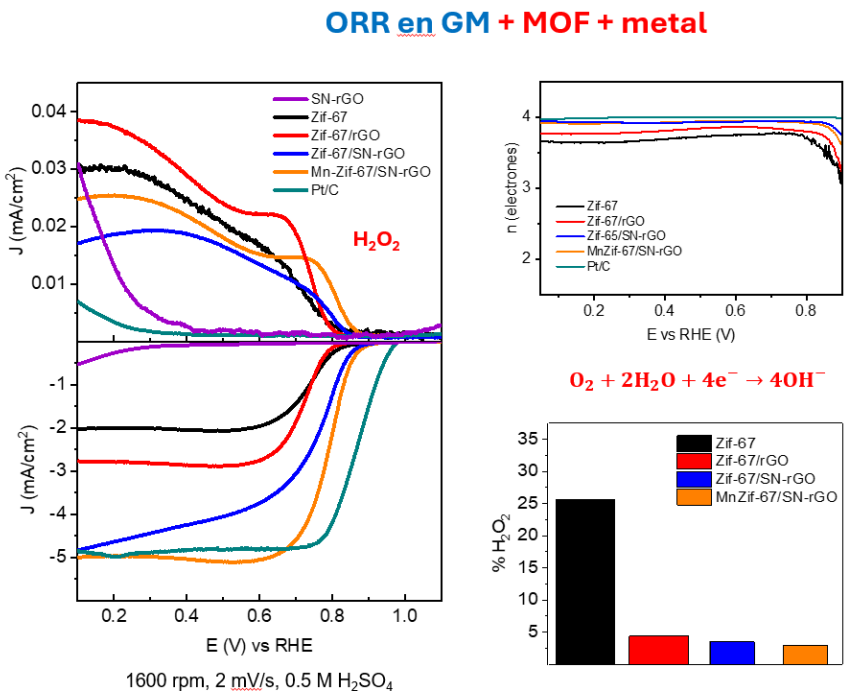
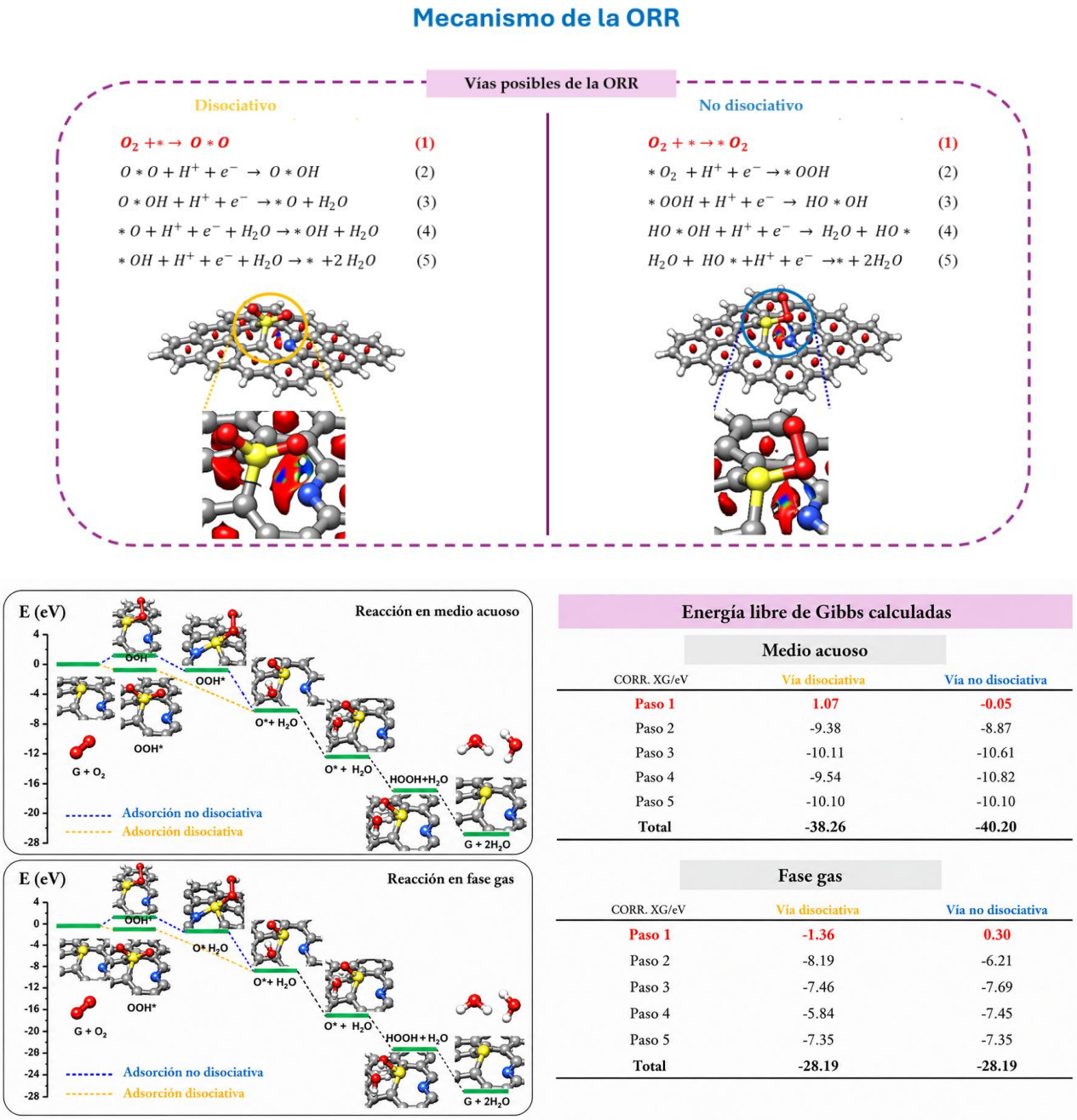


Figura 12. Resultados de la ORR obtenidos con RRDE con los diferentes electrocatalizadores, mostrando que la estrategia sintética permite mejorar la actividad de los materiales disminuyendo la producción de H_2O_2. (Fajardo et al., 2024)

10.4. De la actividad al mecanismo de la ORR: electroquímica y cálculos DFT

El análisis de la actividad electrocatalítica se complementó con un estudio dirigido a identificar los centros activos y discriminar entre las posibles rutas de reacción. Para ello se compararon rGO, N-rGO, S-rGO y SN-rGO mediante electroquímica y cálculos basados en la **teoría del funcional de la densidad** (**DFT**, por sus siglas en inglés). Los modelos consideraron nitrógeno piridínico y azufre tiofénico y evaluaron dos posibilidades principales para la adsorción del oxígeno: una vía disociativa, en la que se rompe el enlace O–O, y una vía no disociativa (Figura 13). (Aguilar-Galindo et al., 2024).



Energía libre de Gibbs calculadas

Medio acuoso

CORR. XG/eV	Vía disociativa	Vía no disociativa
Paso 1	**1.07**	**-0.05**
Paso 2	-9.38	-8.87
Paso 3	-10.11	-10.61
Paso 4	-9.54	-10.82
Paso 5	-10.10	-10.10
Total	**-38.26**	**-40.20**

Fase gas

CORR. XG/eV	Vía disociativa	Vía no disociativa
Paso 1	**-1.36**	**0.30**
Paso 2	-8.19	-6.21
Paso 3	-7.46	-7.69
Paso 4	-5.84	-7.45
Paso 5	-7.35	-7.35
Total	**-28.19**	**-28.19**

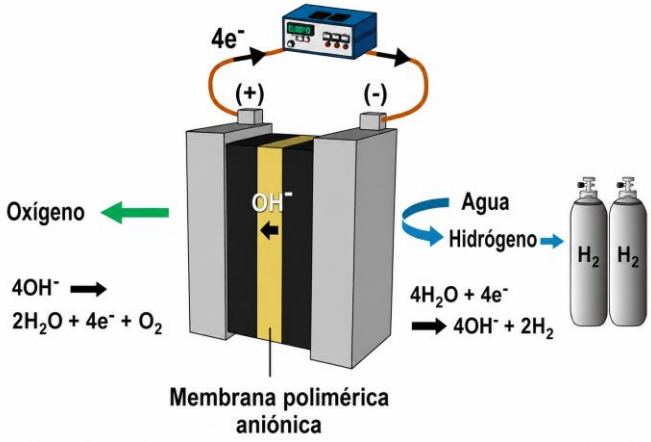
Figura 13. Comparación energética de las vías disociativa y no disociativa de la ORR y fundamento del mecanismo propuesto para SN-rGO. (Aguilar-Galindo et al., 2024)

La conclusión principal del estudio es que el dopaje dual con nitrógeno y azufre mejora significativamente la actividad del SN-rGO, favorece una ruta global de cuatro electrones e inhibe casi por completo la formación de H_2O_2. La interpretación propuesta atribuye este comportamiento a la cooperación entre ambos heteroátomos, que genera un par de Lewis frustrado capaz de favorecer la adsorción disociativa del O_2 y evitar la formación del intermediario OOH asociado a la producción de peróxido. Los cálculos DFT respaldan que la vía disociativa está favorecida, mientras que los análisis de carga y de interacciones no covalentes establecen los sitios implicados (Figura 13). (Aguilar-Galindo et al., 2024).

Este resultado permite identificar una idea transversal a estas contribuciones: el dopaje no actúa únicamente aumentando de forma inespecífica el número de defectos, sino que puede modificar de manera dirigida la estructura electrónica y, con ella, la ruta de reacción. La combinación de medidas electroquímicas con herramientas computacionales permite pasar de la observación de una mejora catalítica a una interpretación molecular de su origen.

10.5. Reacción de evolución de hidrógeno (HER): carburos de metales de transición

La segunda línea de investigación que se va a abordar se dirige a la HER que es la reacción catódica fundamental en la electrólisis del agua (Figura 14). El objetivo común a todos los estudios fue desarrollar materiales activos reduciendo o evitando el empleo de metales nobles.



	Acid media	Alkaline media
Volmer →	$H_3O^+ + e^- \rightleftharpoons H_{ads} + H_2O$	$H_2O + e^- \rightleftharpoons H_{ads} + OH^-$
Heyrovski →	$H_{ads} + H_3O^+ + e^- \rightleftharpoons H_2 + H_2O$	$H_{ads} + H_2O + e^- \rightleftharpoons H_2 + OH^-$
Tafel →	$H_{ads} + H_{ads} \rightleftharpoons H_2$	$H_{ads} + H_{ads} \rightleftharpoons H_2$

Figura 14. Electrolizador PEM con las reacciones que tienen lugar en sus electrodos (arriba) y mecanismo general para la HER en medio ácido y básico (abajo), indicando el nombre por el que se conoce cada una de las etapas.

Una primera familia estudiada fue la de los carburos de metales de transición, materiales de interés por su conductividad, su coste potencialmente reducido y la posibilidad de ajustar composición, tamaño de partícula y estado superficial. (García et al., 2016). Los estudios mostraron que el potencial de inicio de la HER depende fuertemente de la naturaleza del metal y del electrolito. Entre los carburos analizados, el Mo_2C sintetizado por ruta carbotérmica apareció como el material no noble más activo (Figura 15).

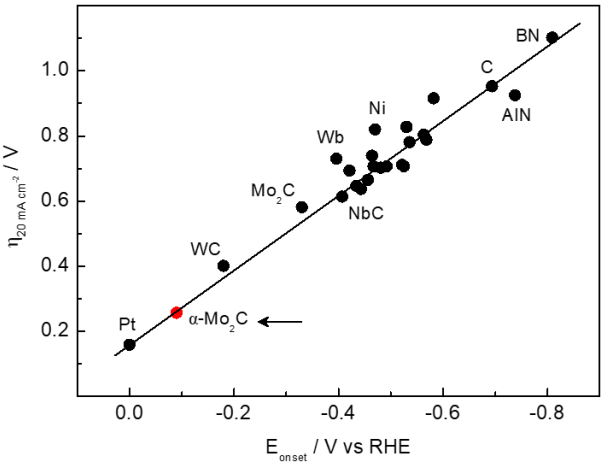


Figura 15. Representación del sobrepotencial a 20 mA/cm² frente al potencial onset de comienzo de la HER. (García et al., 2016).

La caracterización fisicoquímica puso de manifiesto, además, que la superficie real de estos materiales no debe interpretarse simplemente como un carburo ideal: coexiste una fase de carburo con especies oxidadas del metal de transición, circunstancia relevante para interpretar los centros activos (Figura 16). (García et al., 2016; García et al., 2017).

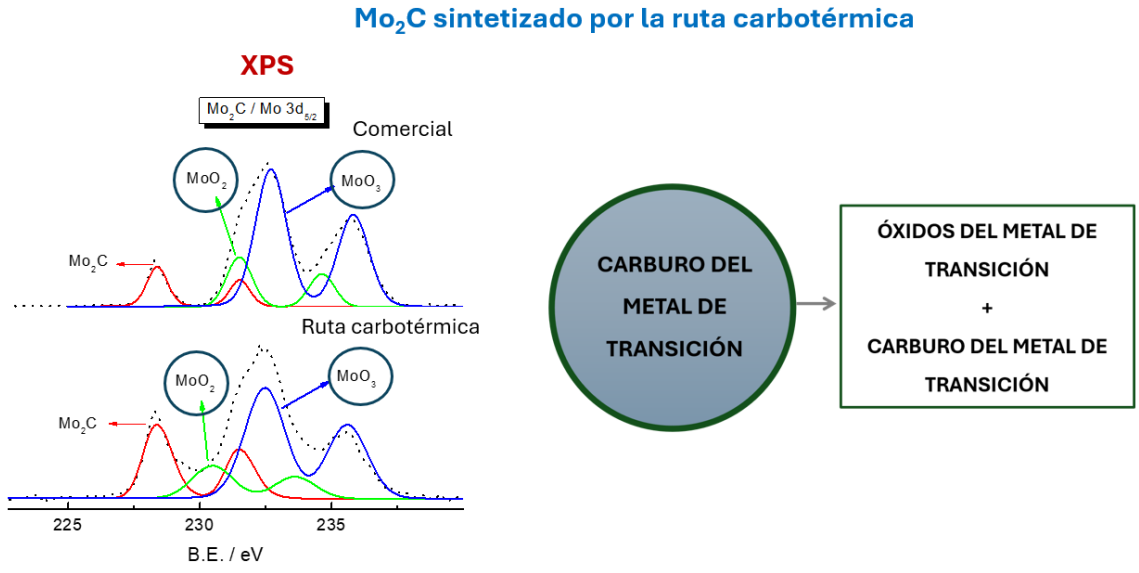


Figura 16. Caracterización por XPS mostrando la presencia de óxido de molibdeno en la superficie del carburo, tanto del sintetizado como del comercial. (García et al., 2016).

10.6. Fases MAX, MXenes y materiales bidimensionales

La búsqueda de electrocatalizadores bidimensionales condujo, posteriormente, al estudio de fases MAX y MXenes basados en molibdeno y titanio. A partir de las fases MAX precursoras (de fórmula general $M_{n+1}AX_n$, donde M es un metal de transición, A es un elemento de los grupos 13-16 de la tabla periódica y X corresponde a C, N), se sintetizaron y caracterizaron las correspondientes fases laminares y sus composites. Al igual que con los electrocatalizadores anteriores, la caracterización fisicoquímica por técnicas espectroscópicas y microscópicas (difracción de rayos X, microscopía electrónica con microanálisis y espectroscopía Raman) permitió seguir la transformación estructural y establecer la naturaleza de los materiales obtenidos (Remedios-Díaz et al., 2024).

Las medidas de **voltamperometría de barrido lineal** (**LSV**) en medio ácido mostraron actividad hacia la HER tanto de fases MAX como en MXenes, aunque en todos los casos el material bidimensional presentó mejor respuesta que la correspondiente fase MAX, con un desplazamiento de las curvas hacia valores más positivos, lo que indica que se precisa menos energía para le producción de hidrógeno (Figura 17). (Delgado et al., 2024).

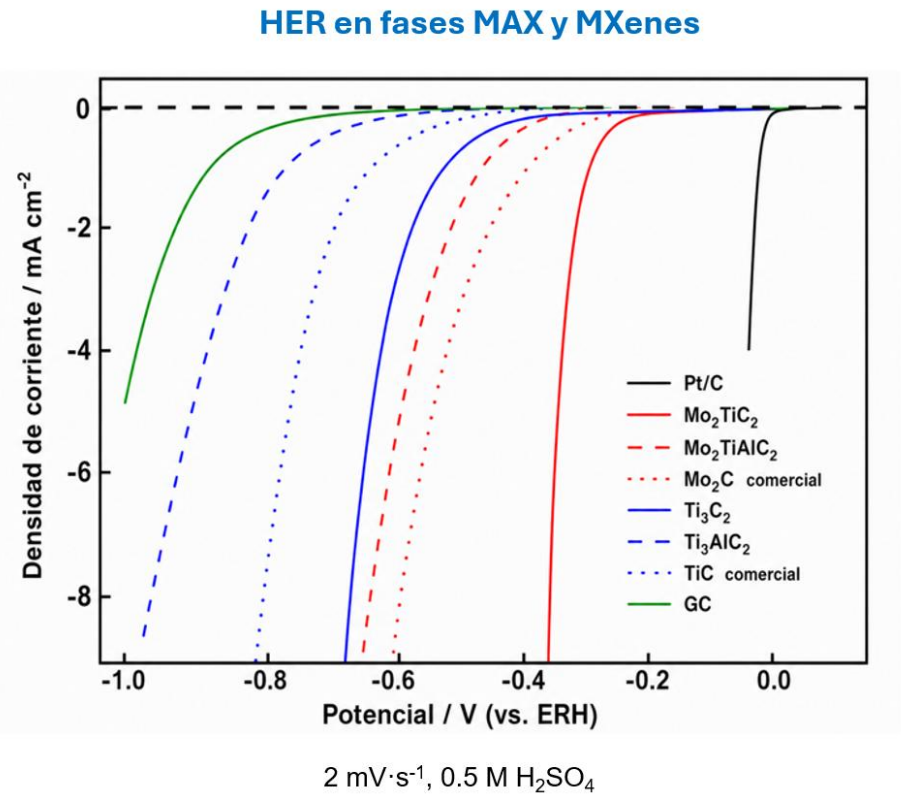


Figura 17. LSV de las fases MAX y MXenes para la HER. (Remedios-Díaz et al., 2024; Delgado et al., 2024).

10.7. Esclarecimiento del mecanismo de la HER mediante espectrometría de masas diferencial electroquímica (DEMS)

A partir de las curvas corriente-potencial (LSV), representando el sobrepotencial frente al logaritmo de la corriente, se pueden determinar las denominadas pendientes de Tafel que aportan información mecanística de la reacción. Si el paso determinante de la reacción es la reacción de Volmer, de acuerdo con el mecanismo de la Figura 14, la pendiente de la representación sería 120 mV/década; si fuera la reacción de Heyrovski, 40 mV/década; y 30 mV/década para la reacción de Tafel como paso determinante.

El problema para hacer este análisis en las curvas de la Figura 17 y establecer el mecanismo reside en que, como se ha comentado anteriormente, cuando se tienen carburos también están presentes óxidos de los metales que lo forman, que contribuirán a las corrientes de reducción que se registran en esas curvas. Por esta razón, se incorporó la **espectrometría de masas diferencial electroquímica** (**DEMS**, por sus siglas en inglés), que permite correlacionar en tiempo real la respuesta electroquímica con la detección de especies volátiles. El montaje combina una celda electroquímica con una membrana que actúa de interfase y un espectrómetro de masas, haciendo posible seguir la señal correspondiente al H_2 durante la polarización del electrodo (Figura 18). Así, la corriente iónica relacionada con la señal masa/carga (m/z) igual a 2 corresponde únicamente a la HER. (Guillén-Villafuerte et al., 2016; Delgado et al., 2024).

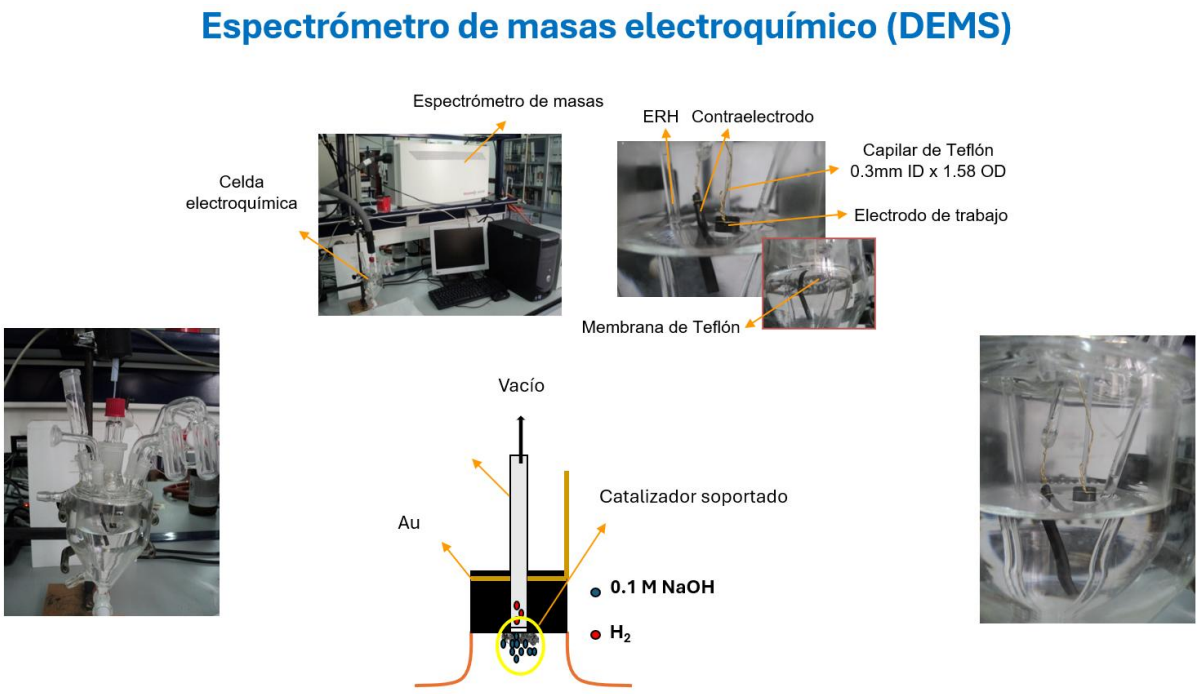


Figura 18. Esquema de espectrometría de masas electroquímica diferencial (DEMS) y su aplicación al estudio mecanístico de la HER.

Aplicada a los MXenes, esta metodología ayuda a confirmar la evolución de hidrógeno y aporta información adicional para la discusión del mecanismo (Figura 19). El análisis de Tafel de las

corrientes faradaicas para le HER sobre los MXenes muestra valores muy superiores a los teóricos (Figura 19c), como era de esperar por la contribución a la corriente faradaica asociada a la reducción de óxidos. Sin embargo, el análisis de las corrientes para m/z = 2 permite establecer un mecanismo de Volmer para el Ti_3C_2 y un Heyrovski-Volmer para el Mo_2TiC_2 (Figura 19d).

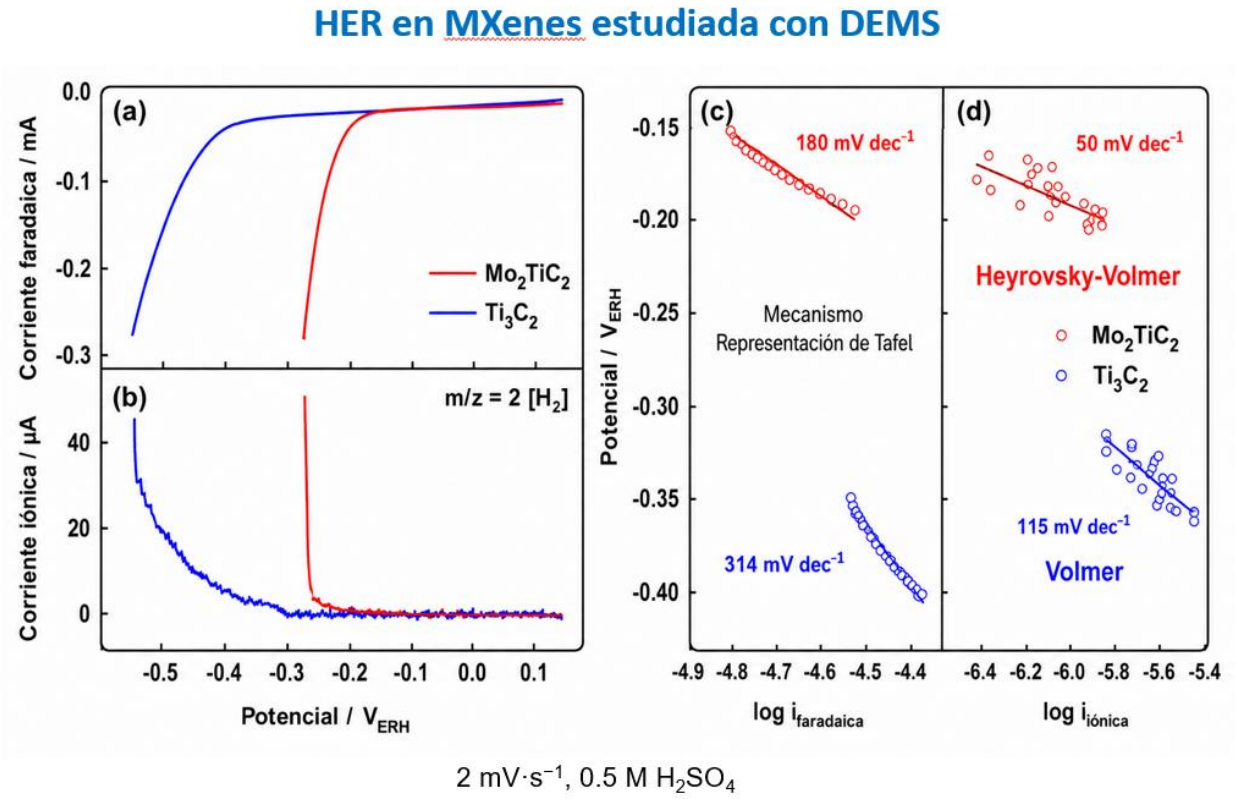


Figura 19. LSV (a), masogramas para el H_2 (b) y análisis de Tafel de las corrientes faradaicas (c) e iónicas (d).

DEMS adquiere así un papel que va más allá de una simple caracterización de los productos generados: permite vincular la corriente registrada con la formación efectiva del producto y contribuye a diferenciar procesos faradaicos de fenómenos superficiales concurrentes. En este caso, esta técnica aparece como una herramienta especialmente valiosa para el esclarecimiento del mecanismo de la HER. (Guillén-Villafuerte et al., 2016; Delgado et al., 2024).

10.8. Composites de materiales grafénicos y MoS_2

Otra vía para aumentar la actividad de materiales libres de metales nobles consiste en construir heteroestructuras bidimensionales en las que diferentes componentes aporten funciones complementarias. En este contexto se prepararon composites con un 1 % de MoS_2 sobre rGO, N-rGO y SN-rGO. La espectroscopía Raman, la microscopía electrónica y la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X se utilizaron para caracterizar la interacción entre el sulfuro de molibdeno y los soportes grafénicos. (Fioravanti et al., 2023).

La respuesta frente a la HER se estudió mediante voltamperometría de barrido lineal y análisis mecanístico (Figura 20). Estos resultados refuerzan la idea de que el diseño de composites bidimensionales constituye una estrategia prometedora para aumentar la actividad: el soporte no actúa únicamente como conductor, sino que puede modificar la dispersión, la accesibilidad y el entorno electrónico de la fase activa. (Fioravanti et al., 2023).

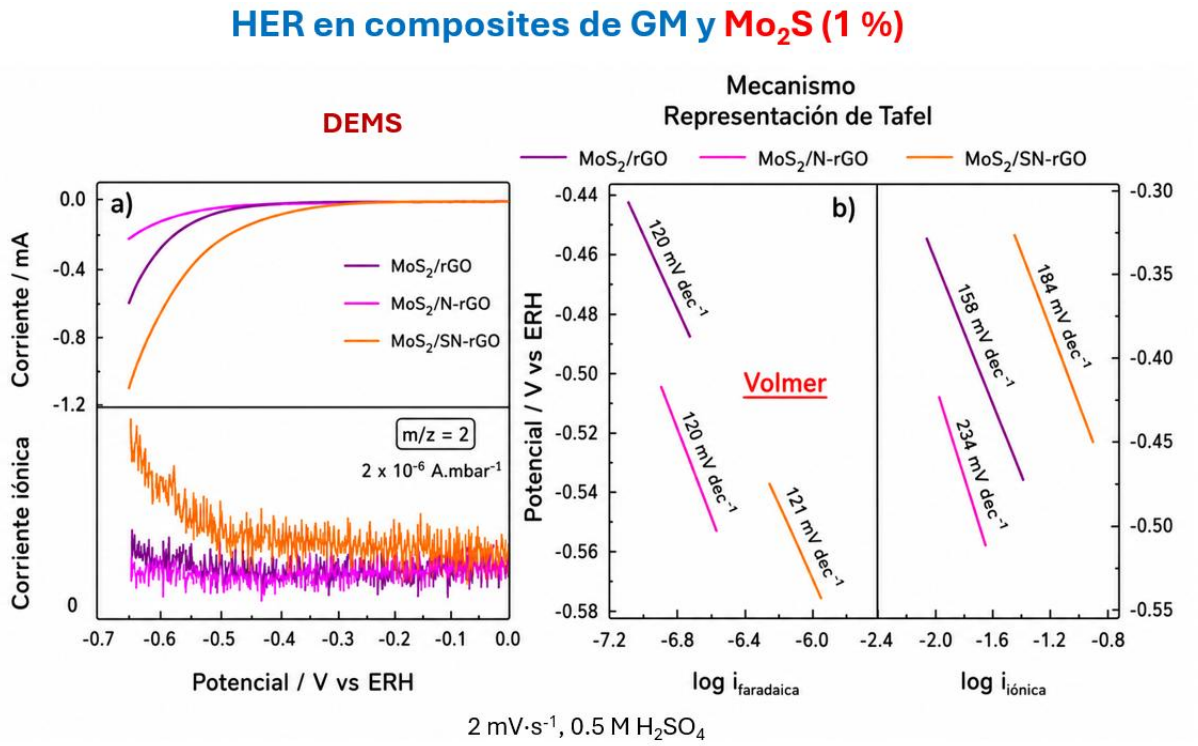


Figura 20. (a) LSV (arriba) masogramas para el H_2 (abajo); (b) análisis de Tafel de las corrientes iónicas y faradaicas. (Fioravanti et al., 2023).

11. Conclusión: estrategia común en el diseño de electrocatalizadores

Consideradas conjuntamente, las investigaciones mostradas de las reacciones de reducción de oxígeno y evolución de hidrógeno muestran una estrategia común. En primer lugar, se parte de materiales abundantes o de soportes carbonosos cuya estructura puede modificarse químicamente. En segundo lugar, se introducen defectos, heteroátomos, metales no nobles o fases bidimensionales para generar nuevos centros activos y modificar la estructura electrónica. Finalmente, la actividad electroquímica se relaciona con la composición y la estructura mediante técnicas de caracterización fisicoquímicas y, cuando es posible, se profundiza en el mecanismo mediante herramientas como el cálculo teórico por DFT o las metodologías espectroelectroquímicas como DEMS.

Para la ORR, los resultados muestran que el dopaje permite modular las propiedades de los materiales grafénicos, que la incorporación de metales no nobles puede producir efectos sinérgicos y que la combinación con MOF amplía el espacio de diseño de catalizadores. El estudio electroquímico-computacional del SN-rGO aporta, además, una interpretación específica de la

selectividad hacia la vía de cuatro electrones. Para la HER, los carburos y los MXenes muestran actividades relevantes, mientras que los composites bidimensionales ofrecen una vía para mejorarla y DEMS permite avanzar desde la medida de actividad hacia la identificación de los productos y la comprensión del mecanismo. (Rivera et al., 2017; Fajardo et al., 2023, 2024; García et al., 2016, 2017; Remedios-Díaz et al., 2024; Delgado et al., 2024; Fioravanti et al., 2023)

Estas contribuciones no resuelven por sí solas todos los retos en el desarrollo de catalizadores para electrolizadores y pilas de combustible, pero permiten identificar principios de diseño que son transferibles: reducir la dependencia de materiales críticos, controlar la química superficial, aprovechar interacciones sinérgicas entre componentes y combinar experimento y modelización para comprender qué sitios son activos y por qué. Es precisamente esta relación entre estructura, actividad y mecanismo la que permite que la electrocatálisis contribuya, desde la escala atómica y molecular, a los desafíos tecnológicos planteados por la economía del hidrógeno.

Agradecimientos

No puedo terminar sin manifestar mi agradecimiento a todos los que me han acompañado en el largo camino de trabajo y esfuerzo, pero también de satisfacciones y muy buenos momentos, que me ha traído hasta aquí.

A mis Padres, dos químicos que, aunque ya no están conmigo, supieron encender en mí la llama de la curiosidad, el gusto por el laboratorio, y la convicción de que el trabajo y el esfuerzo siempre acaban dando sus frutos. Ellos están en el origen de muchas de las decisiones que me han conducido hasta aquí y siempre estarán en mi corazón.

A todos los que en algún momento han formado parte del grupo CISEL, a mis compañeros de la Universidad de La Laguna y a los de tantos otros centros, nacionales e internacionales, no solo por las colaboraciones científicas y por todo lo que hemos aprendido y construido juntos, sino también por su calidad humana. Con muchos de ellos, el trabajo compartido a lo largo de los años ha dado paso a verdaderas amistades que hoy se extienden por muchos lugares del mundo.

A mi marido José Luis, también químico, que me ha acompañado desde que iniciamos juntos los estudios de la Licenciatura en Química en esta Universidad. Hemos compartido desde entonces un largo camino, personal y profesional, y su apoyo y compañía han sido fundamentales para llegar hasta aquí.

A mis hijos, Luis y Cristina, de quienes me siento profundamente orgullosa. A ellos debo agradecerles su comprensión y pedirles también perdón por las ausencias que inevitablemente ha supuesto una vida dedicada, en buena medida, a la Universidad y a la investigación. Pero puedo decir, con enorme satisfacción, que se han convertido en dos grandes personas, y ese es, sin duda, uno de mis mayores logros.

Y finalmente, a todos ustedes, por acompañarme hoy, por compartir conmigo este momento y por contribuir con su presencia en hacerlo aún más especial.

Muchas gracias.

Referencias

- Aguilar-Galindo, F.; Fajardo-Rodríguez, S.; Poyato, J. M. L.; Pastor, E.; Avilés-Moreno, J.-R.; Ocón, P. (2024). *Outstanding inhibition of H_2O_2 generation in doubly doped graphene: The synergy of two heteroatoms opens a new chemical path*. Carbon, 216, 118499. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118499.
- Delgado, S.; Remedios-Díaz, Y.; Calderón, J. C.; Díaz-Coello, S.; Arévalo, M. C.; García, G.; Pastor, E. (2024). *Catalytic activity of 2D MXenes toward electroreduction processes: Oxygen reduction and hydrogen evolution reactions*. International Journal of Hydrogen Energy, 55, 1050–1061. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.288.
- Fajardo, S.; Ocón, P.; Rodríguez, J. L.; Pastor, E. (2023). *Co supported on N and S dual-doped reduced graphene oxide as highly active oxygen-reduction catalyst for direct ethanol fuel cells*. Chemical Engineering Journal, 461, 142053. DOI: 10.1016/j.cej.2023.142053.
- Fajardo, S.; Ocón, P.; Arranz, A.; Rodríguez, J. L.; Pastor, E. (2024). *MnO_2-modified ZIF-67 supported on doped reduced graphene oxide as highly active catalyst for the oxygen reduction reaction*. Journal of Catalysis, 432, 115448. DOI: 10.1016/j.jcat.2024.115448.
- Fioravanti, F.; Martínez, S.; Delgado, S.; García, G.; Rodríguez, J. L.; Pastor Tejera, E.; Lacconi, G. I. (2023). *Effect of MoS_2 in doped-reduced graphene oxide composites. Enhanced electrocatalysis for HER*. Electrochimica Acta, 441, 141781. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141781.
- García, G.; Guillén-Villafuerte, O.; Rodríguez, J. L.; Arévalo, M. C.; Pastor, E. (2016). *Electrocatalysis on metal carbide materials*. International Journal of Hydrogen Energy, 41(43), 19664–19673. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.146.
- García, G.; Roca-Ayats, M.; Guillén-Villafuerte, O.; Rodríguez, J. L.; Arévalo, M. C.; Pastor, E. (2017*). Electrochemical performance of α-Mo_2C as catalyst for the hydrogen evolution reaction*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 793, 235–241. DOI: 10.1016/j.jelechem.2017.01.038.
- Guillén-Villafuerte, O.; García, G.; Arévalo, M. C.; Rodríguez, J. L.; Pastor, E. (2016). *New insights on the electrochemical oxidation of ethanol on carbon-supported Pt electrode by a novel electrochemical mass spectrometry configuration*. Electrochemistry Communications, 63, 48–51. DOI: 10.1016/j.elecom.2015.12.007.
- Remedios-Díaz, Y.; Delgado, S.; Calderón, J. C.; Calvillo, L.; Arévalo, M. C.; Pastor, E. (2024). *Highly active MoS_2-MXenes hybrid electrocatalysts towards the oxygen reduction reaction*. ChemElectroChem, 11, e202300673. DOI: 10.1002/celc.202300673.
- Rivera, L. M.; Fajardo, S.; Arévalo, M. C.; García, G.; Pastor, E. (2017). S- *and N-doped graphene nanomaterials for the oxygen reduction reaction*. Catalysts, 7(9), 278. DOI: 10.3390/catal7090278.

Recursos digitales y fuentes institucionales

- Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2024). Global Hydrogen Review 2024. París: IEA. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024
- Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2024). World Energy Outlook 2024. París: IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024
- Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2025). Global Hydrogen Review 2025. París: IEA. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025
- Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2025). Breakthrough Agenda Report 2025: Hydrogen. París: IEA. https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/hydrogen
- Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) (2025). Renewable Power Generation Costs in 2024. Abu Dabi: IRENA. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024
- Boletín Oficial del Estado (2024). Orden TED/801/2024, de 26 de julio, bases reguladoras del programa de incentivos para proyectos de producción y consumo de hidrógeno renovable (clústeres o valles). BOE núm. 183. https://www.boe.es/eli/es/o/2024/07/26/ted801/dof/spa/pdf
- CIC Energigune, https://cicenergigune.com/es/
- Clean Hydrogen Joint Undertaking (2025). Hydrogen Valleys Facility. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/hydrogen-valleys-facility-2025-07-11_en
- Clean Hydrogen Joint Undertaking (2024). Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027, First Amendment (June 2024). https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/d77c3817-7c2e-447a-ac66-98116c468803_en?filename=First%20Amendment%20of%20the%20SRIA.pdf
- Clean Hydrogen Joint Undertaking (2024). Study on sustainable supply chain and industrialization of hydrogen technologies. 25 October 2024. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/study-sustainable-supply-chain-and-industrialisation-hydrogen-technologies_en
- Clean Hydrogen Joint Undertaking (2024). IMMORTAL Project: Advancing Durable Fuel Cell Technology for Heavy-Duty Vehicles. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/project-updates/immortal-project-advancing-durable-fuel-cell-technology-heavy-duty-vehicles_en
- Comisión Europea (2024). REPowerEU – 2 years on. Directorate-General for Energy. https://energy.ec.europa.eu/publications/repowereu-2-years_en
- Comisión Europea / CINEA (2024). European Hydrogen Bank pilot auction: 132 bids received from 17 European countries. https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/european-hydrogen-bank-pilot-auction-132-bids-received-17-european-countries-2024-02-19_en
- Gobierno de España, Plan de Recuperación (2026). Siete proyectos de grandes valles o clústeres de hidrógeno renovable financiados en el PRTR. Resolución definitiva de 12 de junio de 2025. https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-proyectos-grandes-valles-hidrogeno-renovable-financiados-plan-recuperacion-prtr

- Gobierno de Canarias, Consejería de Transición Ecológica y Energía. Estrategia Canaria del Hidrógeno Verde. Observatorio de la Energía de Canarias. https://www.occet.es/wp-content/uploads/2022/09/D7_Estrategia_hidrogenoVerde_Canarias.pdf
- Gobierno de Canarias (2024). Canarias pone en marcha su primera guagua eléctrica a base de hidrógeno verde, 26 de marzo de 2024. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/hemeroteca/canarias-pone-en-marcha-su-primera-guagua-electrica-a-base-de-hidrogeno-verde/
- Gobierno de Canarias (2024). Informe de Impacto Ambiental del proyecto RESH2PORT, BOC núm. 202, 10 -10 - 2024. https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/202/index.html
- Gobierno de Canarias (2025). Canarias consolida su liderazgo en hidrógeno renovable en la clausura del Plan Complementario estatal, 16 de diciembre de 2025. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/canarias-consolida-su-liderazgo-en-hidrogeno-renovable-en-la-clausura-del-plan-complementario-estatal/
- Horizon Europe. SUSTAINCELL: Durable and Sustainable component supply chain for high performance fuel cells and electrolysers. https://cordis.europa.eu/project/id/101101479
- IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030, actualización de 2024. Real Decreto 986/2024. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-19278
- Proyecto H2Med (2023-2025). Información oficial del proyecto H2Med y su inclusión como Proyecto de Interés Común de la Unión Europea. https://h2medproject.com/
- Proyecto H2Verde de PLOCAN (2022-2025): producción experimental de hidrógeno a partir de agua desalada y energías renovables. https://plocan.eu/proyectos/h2-verde-energia-e-hidrogeno-renovable
- U.S. Department of Energy. Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications; Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. https://www.energy.gov/cmei/fuels/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications