

Preparación y evaluación de nanomateriales para aplicaciones en producción y almacenamiento de energía

Preparation and evaluation of nanomaterials for applications in energy production and storage

Beatriz Ruiz Camacho¹, Edgar David Méndez Perez¹, Jesús Fernando Mendoza Villagomez², Kevin José del Castillo Silva¹

¹División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE), Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato. Noria Alta s/n Guanajuato, 36000 México.

²División de Ciencias de la Vida (DICIVA), Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Ex Hacienda El Copal, Carretera Irapuato-Silao Km. 9, Irapuato, Gto. 36500 México.

beatriz.ruiz@ugto.mx

Resumen

El desarrollo de electrocatalizadores libres de metales nobles con eficiencias superiores para catalizar la reacción de reducción de oxígeno (RRO), sigue siendo un desafío para la aplicación de celdas de combustible. En este trabajo se evaluaron electroquímicamente nanomateriales a base de óxido de grafeno dopado con nitrógeno y funcionalizados con cobalto (Co-N-GO) y hierro (Fe-N-GO) como electrocatalizadores catódicos para la RRO y la reacción de evolución de oxígeno (REO) en medio ácido. Se investigó el efecto del método de síntesis térmico (in-situ) e hidrotermal (post-síntesis), y el desempeño del metal de transición utilizado (Fe vs Co). La evaluación de la actividad electrocatalítica se efectuó mediante las técnicas electroquímicas de voltamperometría cíclica (CV) y voltamperometría lineal de barrido (LSV), arrojando una respuesta aceptable, con mejora en potencial de inicio y potencial de media onda cuando se incorpora el Fe y Co. Se encontró que los materiales sintetizados por el método in-situ presentan mayor potencial de inicio para la RRO. Por otro lado, para catalizar la REO, se encontró que el método más favorable es el post-síntesis. Estos resultados indican que es posible obtener materiales específicos para una reacción en particular, seleccionando adecuadamente el método de síntesis, resultando así electrocatalizadores prometedores para los sistemas de conversión de energía.

Palabras clave: nanomateriales, energía, celdas de combustible, electrodos.

Introducción

Combustibles convencionales como carbón, petróleo y gas natural han sido ampliamente usados para satisfacer las necesidades de energía a nivel mundial generando graves problemas de contaminación ambiental (Ansari, 2024). Actualmente se busca implementar el uso de energías renovables. El hidrógeno (H_2) como vector energético puede ser utilizado en pilas de combustible para producir energía eléctrica más limpia (Li, 2020).

Diversos sistemas para la conversión de energía han sido reportados, tales como, electrolizador de membrana de intercambio de protónico (PEMWE) (Deng, 2024), celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) (Pech-Pech, 2015) y electrolizador de membrana de intercambio de protónico de alta temperatura (HT-PEMWE) (Mooste, 2025). Una celda de combustible es un dispositivo que convierte la energía química almacenada en un combustible (H_2) en energía eléctrica.

En la Figura 1 se presenta una representación esquemática de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico.

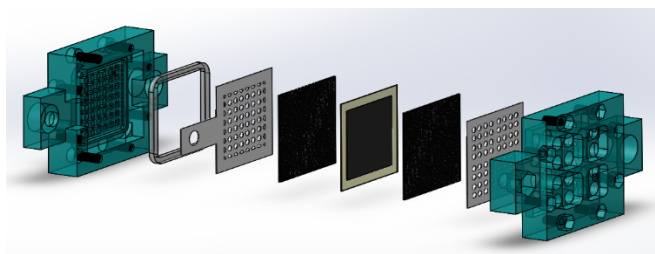


Figura 1. Diagrama simplificado de los componentes de una celda de combustible, en el centro se encuentra el ensamblaje membrana-electrodo (MEA), difusores de gases, colectores de corriente, empaques y carcasa.

La celda de combustible es similar a una batería, está constituida de un electrolito polimérico y dos electrodos (cátodo y ánodo). Los electrodos comerciales están hechos a base de nanopartículas de Pt soportado en carbono (Pt/C).

Una de las mayores dificultades en la implementación de dispositivos PEMFC es la necesidad de desarrollar nanomateriales a base de catalizadores de metales no preciosos (NPMC) para el cátodo, con el objetivo de reemplazar a los actuales (Pt/C), debido a su elevado costo y fácil contaminación durante su operación (Mooste, 2025). Los nanomateriales son materiales que poseen un tamaño menor a 100 nanómetros en al menos una de sus dimensiones (Figura 2), los cuales han ganado importancia gracias a que presentan propiedades fisicoquímicas diferentes que el compuesto químico equivalente a un tamaño macroscópico (Estrada-Flores, 2023)

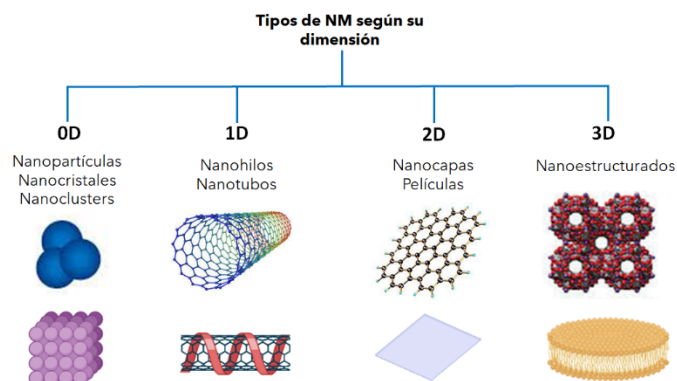
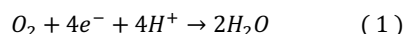


Figura 2. Tipos de nanomateriales según su dimensión. Tomado de Estrada-Flores, 2023.

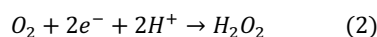
La reacción de reducción de oxígeno (RRO) y la reacción de evolución de oxígeno (REO) son indiscutiblemente las reacciones electroquímicas más importantes asociadas en el cátodo de una celda de combustible y una batería metal-aire, respectivamente. Estos dispositivos electroquímicos permiten la conversión y almacenamiento de energía (Luque-Centeno, 2018). Las condiciones ácidas y oxidativas severas inherentes a la REO frecuentemente propician una rápida degradación catalítica (Deng et al., 2024), esto plantea un reto significativo, así como una línea de investigación importante en la creación de sistemas en medios ácidos para la obtención de combustibles usados como energías renovables.

En la actualidad, la mayoría de los catalizadores empleados en las reacciones de evolución de oxígeno usan materiales a granel como componente activo. Estos materiales poseen una baja área superficial e insuficientes sitios activos. En base a esta limitación, la fabricación de nanopartículas (Li, 2020; Pech-Pech, 2015) ha emergido como un método eficaz para mejorar la actividad y estabilidad de la reacción de evolución de oxígeno.

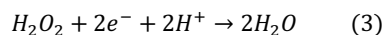
La RRO puede darse a través de dos vías, la vía directa de 4 electrones (Mooste, 2025).



O la vía de 2 electrones:



El H_2O_2 puede seguir con la reducción de los 2 electrones, resultando la vía:



En las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), tanto la ruta directa de 4 electrones ($4e^-$) como la ruta de $2e^-$ (donde el peróxido de hidrógeno se reduce en un segundo paso) son energéticamente favorables para RRO.

En la actualidad, los nanomateriales de carbono con una alta área superficial, que están co-dopados con metales de transición (TM) y nitrógeno (N), se consideran las tecnologías más prometedoras entre los catalizadores de metales no preciosos (NPMC) (Mishra, 2023; Mooste, 2025). Los principales desafíos que enfrentan estos NPMC son dos: conseguir una alta actividad catalítica en la RRO y garantizar una durabilidad a largo plazo. Para que un catalizador sea realmente útil en aplicaciones prácticas, es fundamental abordar ambos aspectos al mismo tiempo. En este contexto, el óxido de grafeno (OG) y sus derivados se han consolidado como iniciativas catalíticas versátiles. El OG posee una serie de propiedades intrínsecas, tales como una elevada área superficial, excelente conductividad eléctrica (especialmente tras su reducción parcial), notable estabilidad química y una estructura flexible que admite modificaciones químicas mediante dopaje con heteroátomos (N, B, S) o incorporación de metales de transición (Fe, Co, Mn, Ni). El dopaje con nitrógeno, en particular, favorece la generación de defectos estructurales y modifica la densidad de estados electrónicos en el material, mejorando la adsorción y activación de especies de oxígeno durante la ORR (Liang, 2011). La Figura 3, representa la estructura de OG dopado con N para catalizar la RRO, vía directa de 4 electrones para producir agua.

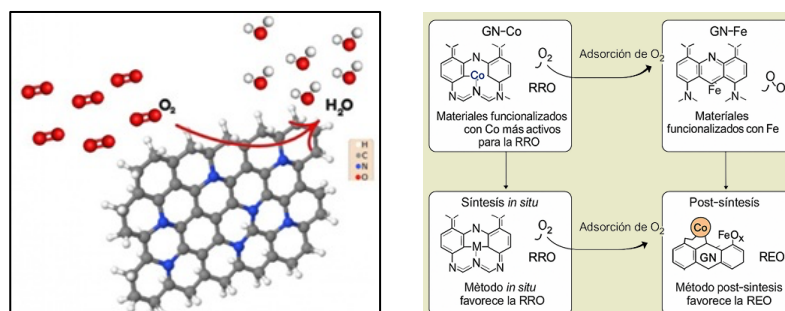


Figura 3. (Izquierda) Reducción de oxígeno utilizando OG dopado con N como electrocatalizador (elaboración propia), (Derecha) esquemas de los materiales dopados y funcionalizados con Co y Fe.

Asimismo, la incorporación de metales como hierro (Fe) o cobalto (Co), coordinados con nitrógeno en sitios activos tipo $M-N_x$, incrementa la eficiencia catalítica al promover el mecanismo de transferencia directa de cuatro electrones, considerado más deseable para la reducción completa de oxígeno a agua. Investigaciones recientes han demostrado que materiales de Fe-N-C presentan actividad para la RRO en electrolitos ácidos, y se atribuye esta alta actividad principalmente a las estructuras atómicas de $Fe-N_4$ (Müller-Hülstede, 2024).

El presente trabajo se plantea realizar un estudio electroquímico sobre la actividad electrocatalítica para la RRO y la REO en medio ácido, utilizando electrocatalizadores de óxido de grafeno dopado con nitrógeno y funcionalizados con Co y Fe, sintetizados mediante una ruta hidrotérmica (*post-síntesis*) y una ruta térmica (*in-situ*) para su posible aplicación como electrodos catódicos en celdas de combustible y baterías metal-aire.

Metodología Experimental

Los materiales de estudio de OG dopando y funcionalizados fueron preparados por el grupo de trabajo [Castillo Silva, 2025]. La funcionalización con metales de transición como el Hierro y Cobalto se llevó a cabo mediante una ruta hidrotérmica (*post-síntesis*) y una ruta térmica (*in-situ*), obteniendo las siguientes muestras en las cuales varía la composición, el método de síntesis y el metal de transición utilizado (Fe vs Co): a) OG-N, b) Co-OG, c) Co-N-OG (*in-situ*), d) Co-N-OG (*post-síntesis*), e) Co-OG-N, f) Fe-OG-N, g) Fe-N-OG *in-situ* y h) Fe-OG.

Los electrocatalizadores se estudiaron electroquímicamente en la RRO y la REO en medio ácido (H_2SO_4 0.5 M) utilizando un potencióstato/galvanostato Gamry Instruments Reference 1000T, empleando una celda de tres electrodos. El electrodo de referencia fue un electrodo de Calomel Saturado (SCE) ($E = 0.241$ V), mientras que el electrodo auxiliar consistió en un alambre de platino. Como electrodo de trabajo se utilizó un disco de carbón vítreo (glassy carbon) modificado con los catalizadores sintetizados. El sistema electroquímico utilizado se muestra en la Figura 4a.

Para la preparación de la tinta catalítica, se pesaron 3 mg del catalizador y se transfirieron a un tubo Eppendorf de 3 mL. Posteriormente, se añadieron 300 μL de isopropanol como disolvente y 5 μL de Nafion® al 5% en peso. La mezcla se dispersó mediante sonicación en baño ultrasónico durante 1 hora a 37 kHz al 60% de potencia para asegurar una dispersión homogénea y estable de las partículas catalíticas. Finalmente, se depositaron 10 μL de la tinta sobre la superficie pulida del electrodo de carbón vítreo, asegurando un recubrimiento uniforme (Figura 4b). El electrodo modificado se dejó secar a temperatura ambiente por 20 minutos antes de realizar las mediciones electroquímicas.

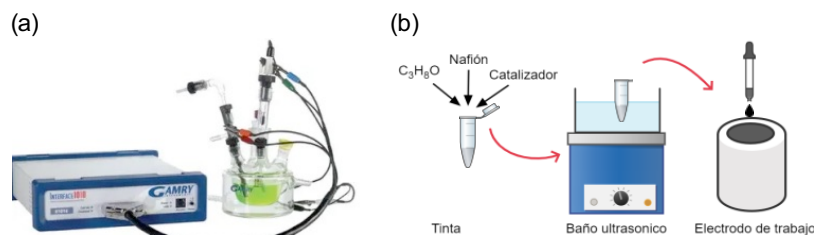


Figura 4. (a) Sistema electroquímico utilizado y (b) preparación del electrodo de trabajo de carbón vítreo

Se realizaron pruebas de voltametría cíclica (CV) así como voltametría lineal (LSV) para evaluar la actividad catalítica de los materiales en la RRO y REO. La voltametría cíclica (CV) es una técnica electroquímica que permite estudiar las propiedades redox de sustancias. Consiste en barrer el potencial de un electrodo de trabajo de manera cíclica, registrando la corriente resultante (Bard Allen J, 2022). La voltametría lineal, también conocida como voltametría de barrido lineal, es una técnica electro-analítica que implica un barrido de potencial desde un valor inicial hasta un valor final. Durante este proceso, se mide la corriente generada en función del potencial aplicado, en este caso para realizar un barrido catódico, lo que permite obtener información sobre la actividad catalítica para reducir el oxígeno. Los potenciales se reportaron respecto al electrodo de referencia de hidrógeno (Ec. 4). Así mismo las lecturas de corriente se convirtieron a densidad corriente utilizando el área geometría del electrodo de trabajo ($\phi=5$ mm) (Ec. 5):

$$E \text{ (RHE)} = 0.059 \cdot pH + 0.241 \quad (4)$$

$$J \text{ (mA/cm}^2\text{)} = J(A) \cdot \frac{1000}{0.1963 \text{ cm}^2} \quad (5)$$

Los reactivos y materiales que se utilizarán en la evaluación electroquímica son ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.5 M, alcohol isopropílico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, Aldrich), solución de 5 % e.p Nafion®, gas nitrógeno (N_2 , INFRA) y gas oxígeno (O_2 , INFRA).

Resultados y discusión

En la caracterización electroquímica de materiales de carbono mediante VC, el décimo ciclo se emplea sistemáticamente como referencia porque permite superar los efectos transitorios iniciales asociados a la activación de sitios electroquímicos y la estabilización de la interfaz material-electrolito. Los primeros ciclos suelen presentar variaciones significativas en la respuesta corriente-potencial debido a procesos irreversibles como la eliminación de impurezas residuales, la hidratación completa de la estructura porosa en carbones modificados, o la transformación redox inicial de grupos funcionales (ej., grupos quinoides en grafeno dopado con nitrógeno). Al alcanzar el ciclo 10, el sistema electroquímico ha logrado un estado estable donde la contribución faradaica (asociada a reacciones químicas) y la no faradaica (capacitancia de doble capa) se equilibran, proporcionando datos reproducibles que reflejan las propiedades intrínsecas del material. Esta práctica está respaldada por estudios fundamentales como el de McCreery (2008).

La Figura 5 muestra los voltamogramas resultantes de la limpieza de los materiales de a) cobalto y b) hierro en atmósfera de nitrógeno. Se observa señales para la RRO entre 0.4 y 0.6 V. Se observa que los materiales con cobalto presentan mayor densidad de corriente en la misma ventana de potencial respecto a los de hierro. Además, la densidad de corriente y los picos de reducción y oxidación encontrados, cambian dependiendo del método de síntesis del material (in-situ, post-síntesis) y de su composición. Lo cual está relacionado con las propiedades fisicoquímicas de los materiales sintetizados, como su estructura, su dispersión, el control de las especies formadas de nitrógeno dopado obtenido (piridínico, pirrólico, cuaternario, oxidado) y del metal utilizado para su funcionalización (Co2p, Co3p, Fe2p, Fe3p) para la creación y aumento de sitios activos, lo cual se refleja en su eficiencia para catalizar la RRO. Se observa que los materiales Co-N-OG post-síntesis y Co-OG-N, así como los resultados de los materiales de Fe presentan una forma cuadrada de VC relacionado con un comportamiento más capacitivo.

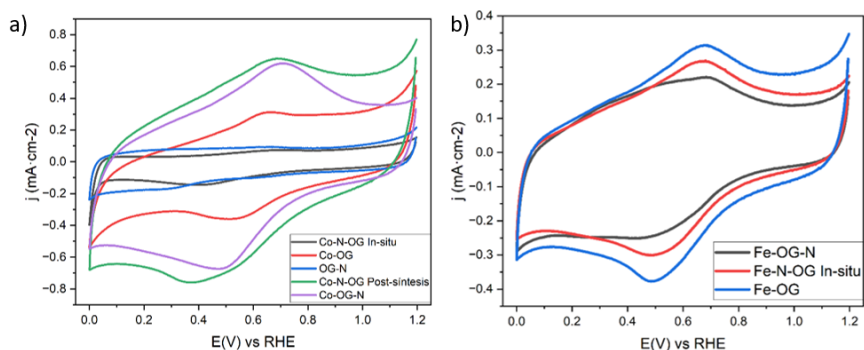


Figura 5. Voltametría cíclica de electrocatalizadores funcionalizados con a) Cobalto y b) Hierro en H_2SO_4 0.5 M. Velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} en atmósfera de nitrógeno.

La Figura 6 (a-e) muestra la actividad catalítica para la RRO obtenida en los nanomateriales con cobalto en medio ácido a diferentes velocidades de rotación (100, 200, 400, 900, y 1600 RPM). Los gráficos muestran el carácter creciente en la zona dominada por la transferencia de masa mientras aumenta la difusión por aumentar las RPM. También se identifica la zona de transferencia de electrones entre 0.5-0.8 V, donde la corriente es la misma independientemente de la velocidad de rotación, lo que indica que la corriente se relaciona directamente con la actividad catalítica y cinética de transferencia de electrones en cada material. En la Figura 6 (f) se muestra una comparación de la VL obtenida en los diferentes materiales a 1600 rpm. La respuesta de Co-N-OG in situ y Co-OG-N se destacan por el potencial de inicio más positivo (0.62 V) y densidad de corriente (1.9 mA cm^{-2}) a 0.15 V más alta comparado con los restantes materiales con cobalto (Tabla 1). La gran similitud que presentan estos dos materiales se puede interpretar a una similar estructura en el catalizador, sin embargo, se observa una estabilidad mayor en la señal del material in situ, denotando que existe una significativa diferencia si se realiza el dopaje en el momento o posterior a la adición de cobalto. Si bien ambas muestras tienen gran similitud, la muestra Co-N-OG destaca debido a que requiere menor tiempo y energía para su síntesis.

Similarmen te, en la Figura 7 (a-c) muestra la respuesta catalítica para los materiales de Fe-OG-N, Fe-N-OG in situ y Fe-OG, respectivamente, a diferentes revoluciones por minuto (100, 200, 400, 900, y 1600 RPM) para evaluar la actividad catalítica para la RRO en medio ácido. Se presenta la misma tendencia creciente que en los materiales de cobalto. La curva de polarización de EDR en la Figura 7 (d) compara la actividad catalítica de estos materiales para la RRO, con las curvas en EDR a 1600 RPM se confirma la mejor respuesta de Fe-N-OG in situ, respecto a otras muestras, esto se observa en el mayor potencial de inicio (0.56 V) y de media onda del material (0.26 V) (Tabla 1).

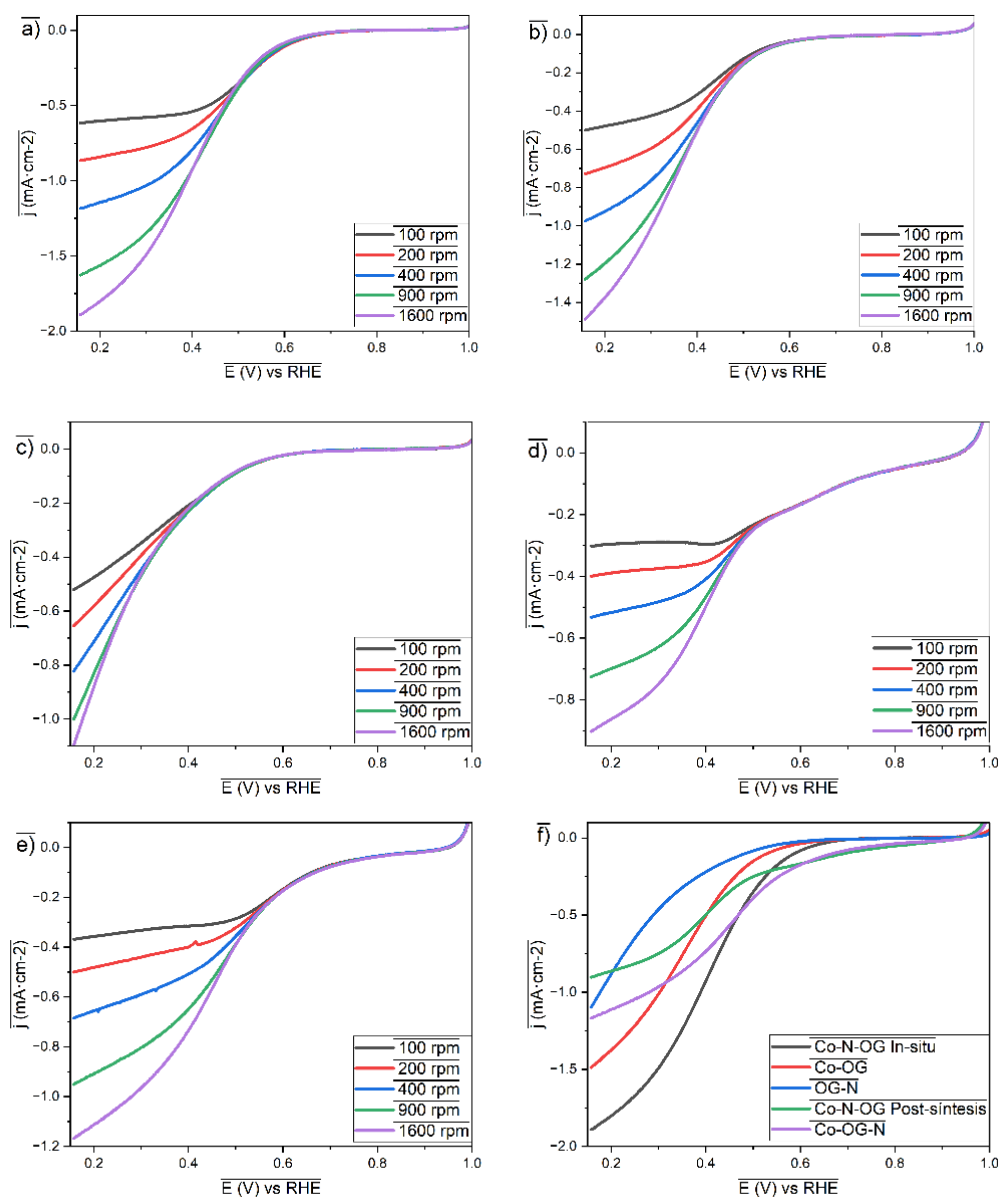


Figura 6. Voltametría Lineal de la RRO obtenida en H_2SO_4 0.5 M a diferentes velocidades de rotación 100-1600 rpm para los electrocatalizadores de a) Co-N-OG In-situ, b) Co-OG, c) OG-N, d) Co-N-OG y e) Co-OG-N. Velocidad de barrido de 5 mV s^{-1} en atmósfera de oxígeno. f) Actividad Catalítica de la RRO a 1600 rpm de los materiales sintetizados con Cobalto.

En la Figura 8 se observa la respuesta electrocatalítica para la REO obtenida mediante voltametría lineal en una ventana de potencial entre 1 y 1.6 V vs RHE para los electrocatalizadores de OG dopado con nitrógeno y funcionalizados con Co (derecha) y Fe (izquierda). La influencia de la adición de cobalto es evidente debido al aumento significativo en las densidades de corriente y la disminución del potencial en la respuesta de los materiales en comparación con el Fe, que presenta menor densidad de corriente (Tabla 1). El resultado muestra la correlación existente entre la REO y la RRO, ya que, al ser reacciones inversas, se explica que las materiales in situ y Co-OG-N presenten una menor respuesta, por el contrario, el material post-síntesis presenta una mayor respuesta para la REO en medio ácido.

En el caso de los materiales de hierro, se observa que el Fe-OG presenta una mayor densidad de corriente, esta respuesta indica que es el mejor material para esta reacción. Los valores numéricos que nos evidencian esta respuesta se presentan en la Tabla 1 donde un menor sobrepotencial indica mayor actividad catalítica para REO. Se observa que el Co-N-OG post-síntesis presenta una mayor señal en el potencial de referencia 1.6 V, esta respuesta indica que es el mejor material para esta reacción.

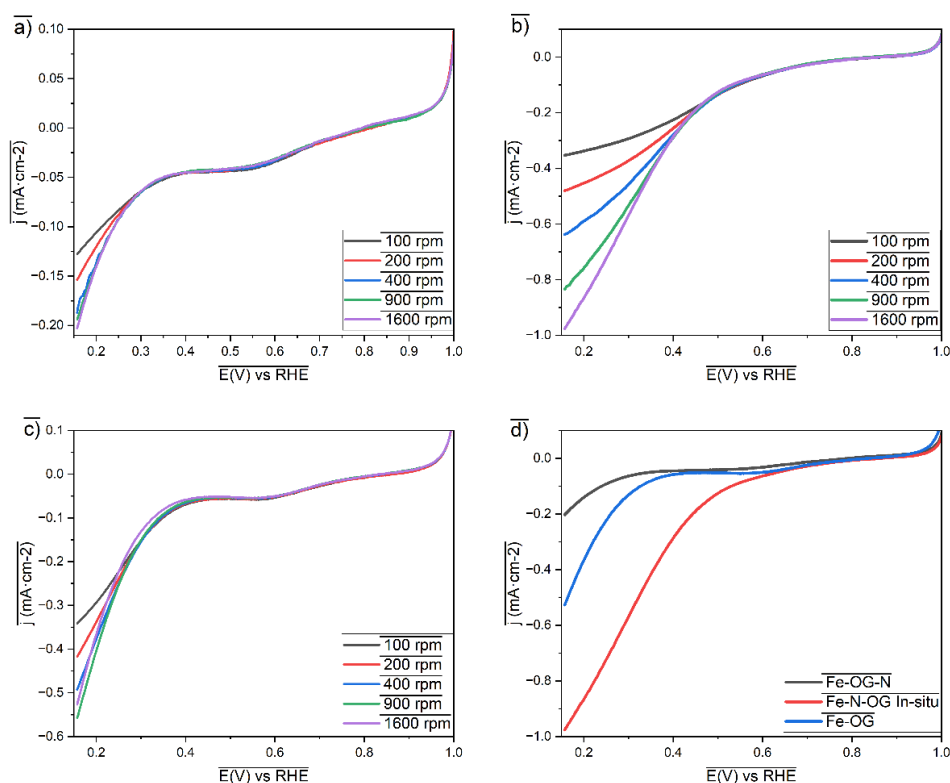


Figura 7. Voltametría Lineal de la RRO obtenida en H_2SO_4 0.5 M a diferentes velocidades de rotación 100-1600 rpm para los electrocatalizadores de a) Fe-OG-N, b) Fe-N-OG In-situ, c) Fe-OG. Velocidad de barrido de 5 mV s^{-1} en atmósfera de oxígeno. d) Actividad Catalítica de la RRO a 1600 rpm de los materiales sintetizados con Fe.

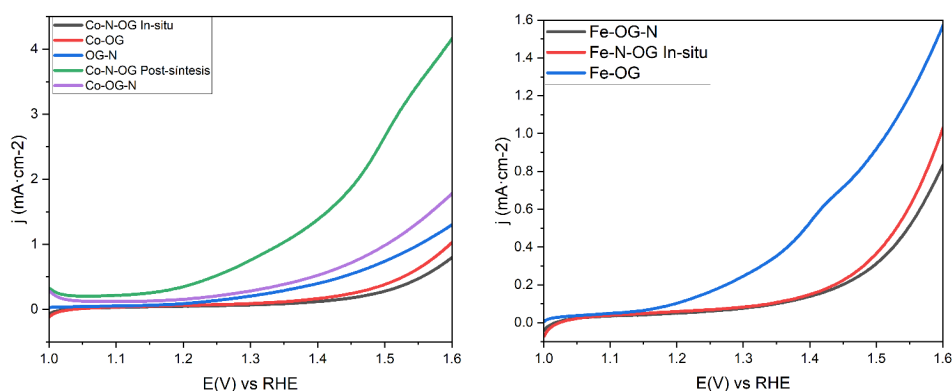


Figura 8. Voltametría lineal de la REO obtenida en los electrocatalizadores de Cobalto (izquierda) y Hierro (derecha) en H_2SO_4 0.5 M y velocidad de rotación 1600 rpm.

En la **Tabla 1** se presenta los parámetros electroquímicos obtenidos en las pruebas anteriores, se indica una mayor eficiencia para la RRO en materiales de cobalto, específicamente en el material Co-N-OG in situ y Co-OG-N. Se tiene un efecto en el metal de transición utilizado para la funcionalización, encontrando que el Co-N-OG in-situ tiene mayor actividad para la RRO respecto al Fe-N-OG in situ. Por su parte la mayor eficiencia para la REO en medio ácido se obtuvo con el material de Fe-OG.

Tabla 1. Parámetros electroquímicos obtenidos en las gráficas VC y VL.

Nanomaterial	Potencial de inicio (V vs. RHE)	Potencial de media onda (V vs. RHE)	Corriente a 1.6 V vs. RHE (mA cm ⁻²)
Co-N-OG in situ	0.62	0.41	0.4
Co-OG	0.57	0.38	0.6
OG-N	0.5	0.2	1.1
Co-N-OG post-síntesis	0.48	0.39	4.1
Co-OG-N	0.58	0.48	1.6
Fe-OG-N	0.28	0.21	0.8
Fe-N-OG in situ	0.56	0.26	0.95
Fe-OG	0.41	0.24	1.55

Conclusiones

Es necesario continuar en el tema de electrocatalizadores nanoestructurados para aplicaciones en conversión de energía para aumentar la actividad catalítica de la RRO, mejorar su eficiencia y favorecer la ruta de transferencia de 4 electrones. En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos en la evaluación de nanomateriales libres de metales nobles a base de óxido de grafeno dopado con nitrógeno y funcionalizados con cobalto y hierro para la RRO y la REO en medio ácido. Por evaluación electroquímica se encontró que los materiales funcionalizados con Co son más activos para la RRO, respecto a los electrocatalizadores Fe. El método de síntesis in-situ permite obtener materiales más activos para la RRO mientras que el método post-síntesis favoreció la REO. Este trabajo da una visión de diseño y preparación factible de catalizadores a base de OG, que pueden extenderse a otras aplicaciones catalíticas. Los resultados de evaluación electroquímica deben relacionarse con las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales en futuros trabajos para dar una explicación a este comportamiento catalítico.

Agradecimientos

A la DAIP por el apoyo al proyecto 339/2025.

Bibliografía/Referencias

1. Ansari, M. Y., Ansari, K. B., & Rizvi, S. J. A. (2024). TiO₂ and sulfonated TiO₂ nanoparticles modified nexar membranes for hydrogen-powered PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.278>
2. Bard Allen, J. (2022) Electrochemical methods , fundamentals and applications, third edition John Wiley & Sons Ltd (1e 1980, 2e 2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications - Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, Henry S. White - Google Libros
3. Castillo Silva, K. J. (2025). Electrocatalizadores Nanoestructurados con Metales de Transición para Sistemas de Producción y Almacenamiento de Energía, Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de nanomateriales, Universidad de Guanajuato, en proceso.
4. Deng, R., Xia, Z., Jiang, Y., Gao, S., He, J., Tang, L., & Liu, F. (2024). Size optimization of IrO_x nanoparticles synthesized by Br mediation for enhanced PEM water electrolysis. *Molecular Catalysis*, 559, 114068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mcat.2024.114068>
5. Estrada-Flores S. L., Garcias-Morales C., Pérez Berumen C. M. & Cantú-Sifuentes, L. (2023). Nanomateriales: conceptos, aplicación en nanoterapia y regulaciones, *Química Viva*, 1,22. www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar
6. Liang, Y., Li, Y., Wang, H., Zhou, J., Wang, J., Regier, T., & Dai, H. (2011). Co₃O₄ nanocrystals on graphene as a synergistic catalyst for oxygen reduction reaction. *Nature Materials*, 10(10), 780-786. <https://doi.org/10.1038/nmat3087>
7. Li, Q., Li, J., Xu, J., Zhang, N., Li, Y., Liu, L., Pan, D., Wang, Z., & Deepak, F. L. (2020). Ultrafine-Grained Porous Ir-Based Catalysts for High-Performance Overall Water Splitting in Acidic Media. *ACS Applied Energy Materials*, 3(4), 3736-3744. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00201>
8. Luque-Centeno, J. M., Martínez-Huerta, M. V., Sebastián, D., Lemes, G., Pastor, E., & Lázaro, M. J. (2018). Bifunctional N-doped graphene Ti and Co nanocomposites for the oxygen reduction and evolution reactions. *Renewable Energy*, 125, 182-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.073>
9. McCreery, R. L. (2008). Advanced carbon electrode materials for molecular electrochemistry. *Chemical Reviews*, 108(7), 2646-2687. <https://doi.org/10.1021/cr068076m>
10. Mishra, K., Devi, N., Siwal, S. S., & Thakur, V. K. (2023). Insight perspective on the synthesis and morphological role of the noble and non-noble metal-based electrocatalyst in fuel cell application. *Applied Catalysis B: Environmental*, 334, 122820. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122820>

11. Mooste, M., Müller-Hülstede, J., Schonvogel, D., Zierdt, T., Buschermöhle, J., Fuhrmann, K., Wilhelm, M., Wagner, P., & Friedrich, K. A. (2025). Binary transition metal and ZIF-8 functionalised polymer-derived ceramic catalysts for high temperature PEM fuel cell cathode. *Electrochimica Acta*, 514, 145620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145620>
12. Müller-Hülstede, J., Schmies, H., Schonvogel, D., Meyer, Q., Nie, Y., Zhao, C., Wagner, P., & Wark, M. (2024). What determines the stability of Fe-N-C catalysts in HT-PEMFCs? *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 921-930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.190>
13. Pech-Pech, I. E., Gervasio, D. F., & Pérez-Robles, J. F. (2015). Nanoparticles of Ag with a Pt and Pd rich surface supported on carbon as a new catalyst for the oxygen electroreduction reaction (ORR) in acid electrolytes: Part 2. *Journal of Power Sources*, 276, 374-381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.086>