



ENERGIAS SUSTENTABLES COMO ALTERNATIVA A LA REGENERACIÓN ATMOSFÉRICA

Hilda Margarita Alfaro López

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional
halfarol@ipn.mx

Omar Solorza-Feria

Departamento de Química, Cinvestav,

osolorza@cinvestav.mx

Resumen

Las tecnologías relacionadas con la generación, almacenamiento y aprovechamiento de las energías sustentables, son tecnologías de vanguardia enfocadas a disminuir las afectaciones por la contaminación atmosférica. La industria energética de fuentes limpias de generación de electricidad ha crecido de manera significativa y desplazará a la del carbón como fuente principal de energía eléctrica mundial. La tecnología del hidrógeno está dando un salto sin precedente en su aprovechamiento en celdas de combustible en la lucha contra el cambio climático. En este trabajo se describe la importancia de utilizar esta tecnología que ha demostrado ser económicamente viable, financieramente rentable y socialmente benéfica. El transporte vehicular de celdas de combustible a hidrógeno es la integración de diferentes materiales, partes y componentes que forman parte del desarrollo de este trabajo. Se ha avanzado en la producción de nuevas membranas y materiales catalíticos que por el desempeño que estos tienen, se consideran prometedores en la generación de energía limpia, sustentable con el medio ambiente,

Palabras clave: energías renovables, celdas de combustible de intercambio protónico, catalizadores, membranas poliméricas.



Las diferentes formas de generación, distribución, almacenamiento, aplicaciones y aprovechamiento de fuentes de energía han sido un factor clave en el desarrollo de la economía de un país. Uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la humanidad ha sido la Revolución Industrial, no solo por ser un hecho con cambios políticos, económicos y sociales, sino porque con la producción de bienes y servicios se desencadenaron las primeras afectaciones en el medio ambiente, que fueron significativamente notorias en los lugares de mayor desarrollo. Los avances tecnológicos y científicos dieron paso a la búsqueda de diversas fuentes y transformación de la energía, como de energías renovables y no renovables en electricidad. Se reemplazó el carbón por el petróleo y se inició la explotación de los recursos naturales. El cambio de carbón a combustibles derivados del petróleo contribuyó con la industrialización automatizada, el desarrollo del transporte terrestre y marítimo, comercialización, salubridad, mejoramiento en la calidad y esperanza de vida y con esto, el crecimiento demográfico. Este descontrolado desarrollo en varios ámbitos produjo el declive acelerado del deterioro del medio ambiente, el agotamiento de los recursos energéticos y biológicos, la contaminación de aguas, atmósfera y suelos, así como el calentamiento global y la acumulación de residuos tanto industriales, municipales como domésticos. Desafortunadamente la inestabilidad ambiental, ha impactado gravemente a la humanidad con desastres naturales y la extinción de especies.

Debemos cambiar nuestro régimen en la producción y almacenamiento de energía e irnos más al aprovechamiento de los recursos renovables. El aprovechamiento de las energías renovables y su transformación a energía química basada en tecnologías en el hidrógeno está considerada a ser un elemento

clave para abatir tres de los principales problemas que afectan nuestro actual sistema energético: a) la contaminación ambiental, b) el agotamiento de las reservas de fuentes fósiles y c) los métodos de desarrollo muy centralizados. En este contexto, uno de los enfoques de la investigación científica es recuperar la biodiversidad y el equilibrio ambiental y permitir a la población tener acceso a estas tecnologías limpias de alto rendimiento con costo accesible.

Una nueva era en la generación y aprovechamiento de energía es en las que se trabaja desde hace 15 años, con el reemplazo del transporte vehicular de combustión interna por nuevas tecnologías amigables con el ambiente. La tecnología del hidrógeno ha demostrado ser una alternativa tecnológica sustentable de vanguardia, económicamente viable, financieramente rentable y socialmente benéfica. El hidrógeno puro se obtiene de la electrolisis del agua, utilizando una fuente de energías renovables en donde la energía eléctrica producida de ésta se transforma a energía química (H_2) que puede ser almacenada, transportada y recuperadas para sus diferentes aplicaciones, incluyendo las celdas de combustible. La tecnología hidrógeno ha alcanzado su madurez y ha demostrado ser una tecnología con diversas aplicaciones en dispositivos fijos y estacionarios de alta y baja potencia, además como materia prima para la obtención de amoníaco para la producción de fertilizantes, en el tratamiento de los aceros, en alimentos, en la industria electrónica y aeronáutica y en el transporte vehicular, entre otras. El hidrógeno de alta pureza es un gas portador de energía, obtenida del agua como fuente primaria; es un gas muy volátil, 14 veces más ligero que el aire, incoloro y no tóxico, con un contenido energético de 120 kJ/g, superior al de la gasolina (45.25 kJ/g) y del gas natural (50.19 kJ/g). Sin embargo, no existe en la naturaleza de forma natural, hay que producirlo y

almacenarlo. La electrolisis del agua con electricidad de fuentes renovables es un proceso muy versátil para la obtención de hidrógeno de alta pureza.

La utilización del hidrógeno para la producción de electricidad en las celdas de combustibles para el transporte eléctrico híbrido, es la que presenta un panorama actual más prometedor. Se están desarrollando en diferentes continentes hojas de rutas del hidrógeno para su aprovechamiento. Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos semejantes a las baterías tradicionales, en donde se llevan a cabo la reacción de oxidación de hidrógeno y la reducción del oxígeno del aire, dando como reacción global agua, electricidad y calor.

Celda de combustible de intercambio protónico

Existen diferentes tipos de celdas de combustible, cuya clasificación se basa en el tipo de electrólito y la temperatura de operación empleada. Esta clasificación determina el tipo de reacciones que tienen lugar en una celda, el tipo de catalizadores utilizados, el intervalo de temperaturas de operación y el combustible requerido principalmente. En la actualidad existen varios tipos de celdas combustibles que utilizan el hidrógeno como opción energética, entre las que podemos mencionar las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico o combustible de membrana polimérica (PEMFC, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* o *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), celdas de combustible alcalinas (AFC, *Alkaline Fuel Cell*), celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, *Phosphoric Acid Fuel Cell*), celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, *Molten Carbonate Fuel Cell*) y las celdas de

combustible de óxidos sólidos (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*).

De todas estas celdas, la PEMFC es la más eficaz, debido a que ofrece varios beneficios, tales como:

- Uso en aplicaciones de sistemas portátiles, almacenamiento preventivo de energía y transporte.
- Producción de calor y agua como subproductos, no invasivos al ambiente.
- Temperatura de operación por debajo de 150°C.
- Electrolito sólido que disminuye el grado de corrosión en los electrodos y facilita su uso.

Una celda de combustible consta de placas terminales y placas de grafito colectoras de corriente en los extremos y en la parte central un ensamble membrana-electrodo, el cual es la parte medular de estos dispositivos (Figura 1).

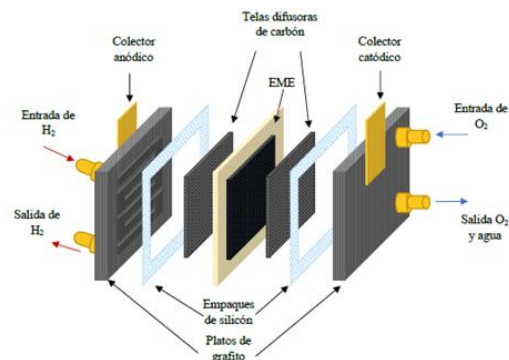


Figura 1 Partes principales de una celda de combustible de membrana polimérica (PEM).

Tomada de: Reyes Rodríguez, J.L. (2018). *Estudio de la síntesis, caracterización y desempeño de nanocatalizadores poliédricos Ni-Pt y su aplicación como cátodos en celdas de combustible poliméricas* (Tesis de doctorado). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

El ensamble membrana-electrodo, EME o MEA (*Membrane Electrode Assembly*) lo



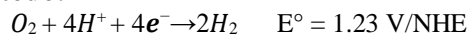
constituye una membrana de conducción protónica en la parte central y materiales catalizadores soportados en carbón y adheridos en tela de carbón utilizado como difusores de los gases reactivos en ambos lados. Una cara de este ensamble actúa como ánodo en donde ocurre la reacción de oxidación del combustible (H_2) y la otra cara como cátodo en donde ocurre la reacción de reducción del oxígeno ya sea puro o del aire.

Las reacciones involucradas en los electrodos de las celdas de combustible poliméricas son:

Ánodo:



Cátodo:



Reacción neta:



La reacción catódica es la más lenta y representa la etapa determinante de la reacción global.

Catalizadores.

La parte medular de la celda de combustible es la MEA, la cual consiste en una membrana polimérica, que tiene un material catalítico soportado en carbón por ambos lados de sus superficies y que constituyen los electrodos de la celda. El objetivo del material catalítico es aumentar la rapidez de la Reacción de Reducción de Oxígeno (RRO) debido a que la cinética de esta reacción es muy lenta, al menos cuatro órdenes de magnitud más lenta que la del hidrógeno. El material más empleado actualmente para acelerar esta reacción es a base de platino, sin embargo, es un metal escaso en la naturaleza y por consecuencia costoso. Otra de sus desventajas del Pt es que

presenta problemas de estabilidad y envenenamiento por CO. Mucho del trabajo de investigación en celdas de combustible está centrado en la búsqueda de nuevos materiales catalizadores, estables, económicos y selectivos para las reacciones en las celdas de combustible poliméricas, con actividad catalítica superior al del Pt puro. Para este fin se han demandado características específicas de los catalizadores tales como:

Materiales nanoestructurados: desarrollo de nuevos materiales de tamaño nanométrico con el fin de mejorar la cobertura y el área de contacto entre el catalizador y los reactivos. Mientras menor sea el tamaño del material catalítico mayor será su área electroquímicamente activa (AEA), lo que favorece los sitios de contacto por unidad de masa y superficie del material.

Planos cristalinos: tendencia a obtener nanocatalizadores con planos cristalinos (111), al ser demostrado de diversos estudios que la morfología de las nanopartículas octaédricas de Pt con facetas (111) tiene mayor actividad catalítica para la RRO que las nanopartículas esféricas o cúbicas con planos (100) (Figura 2).

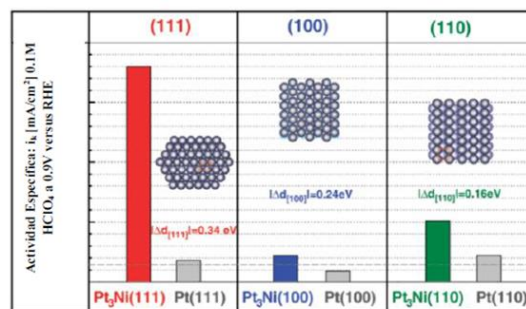


Figura 2 Actividades catalíticas específicas para sistemas orientados Pt₃Ni.

Tomada de: Stamenkovic, V.R., Fowler, B., Mun, B.S., Wang, G., Ross, P.N., Lucas, C.A., Markovic, N.M. (2007). "Improved Oxygen Reduction Activity on Pt₃Ni (111) via Increased Surface Site Availability", *Science* 315, 493-497. Disponible: <http://doi.org/10.1126/science.1135941>



Composición: desarrollo de nuevos nanocatalizadores para la RRO ya sea con disminución del contenido de Pt o eliminar completamente su contenido en el material. Una investigación extensa de diferentes composiciones puede ser una buena estrategia para lograr la composición óptima. La primera tendencia se ha explorado al formar aleaciones bimetalicas o trimetalicas nanométricas, con elementos no nobles del periodo 4 de los metales de transición. Se han elegido elementos metálicos como: Mn, Fe, Co, Ni y Cu, que al ser más abundantes en la naturaleza y más económicos, se combinan en mayor proporción y con diferentes estructuras con el Pt para disminuir su contenido. La explicación generalizada sobre el efecto que tiene la incorporación de uno o más metales aleados con el platino, es que estos le confieren nuevas propiedades intrínsecas por la estructura geométrica y configuración electrónica del material catalítico formado. A nivel estructural, los metales aleados disminuyen las distancias interatómicas entre los átomos de Pt modificando los parámetros de celda de la estructura cristalina - por efectos geométricos - al interaccionar entre sí metales con distintos tamaños de celda. A nivel electrónico, se promueven estructuras electrónicas con vacancias en los orbitales $5d$ para que - en el caso de un proceso de reducción como la ORR - la donación de electrones se efectúe desde la superficie del electrodo a los orbitales π de antienlace de la molécula de oxígeno, facilitando con ello los procesos de adsorción, la formación de especies OH sobre la superficie de las partículas de la aleación y la consecuente disociación del O_2 . Uno de los problemas encontrados al usar aleaciones es su baja estabilidad en condiciones de operación de la celda de combustible; esto debido a que el medio ácido degrada el catalizador por disolución del elemento no noble.

Otra opción es el desarrollo de estructuras *núcleo-coraza* (*core-shell nanoparticles*) en

donde primero se obtienen nano-partículas de un metal no noble y posteriormente se recubren con Pt, formando monocapas sobre el primer metal para protegerlo de la degradación y al mismo tiempo disminuir el contenido del Pt y aprovechar más eficientemente este metal por ser más activo en la superficie. Una revisión bibliográfica sobre el trabajo desarrollado por grupos de mexicanos en esa dirección ha sido publicada recientemente.

Membrana Polimérica de Intercambio Protónico (PEM).

La membrana polimérica con conducción protónica en ensamble membrana-electrodo, es un componente clave en el buen funcionamiento de un dispositivo electroquímico y tiene un papel transcendental en el buen desempeño de una celda de combustible. Una de las funciones mecánicas de la membrana es separar los electrodos para evitar la mezcla de los gases reactivos (combustible y oxidante); químicamente debe actuar como selector de sustancias al permitir el transporte de iones específicos (H^+) del ánodo al cátodo, para el funcionamiento óptimo de la celda de combustible polimérica. La membrana se localiza en el centro de la celda de combustible, de ahí su designación como celda de combustible de membrana polimérica PEMFC.

Las celdas de combustible poliméricas operan a temperaturas cercanas a $100^\circ C$ y otras a temperaturas superiores, por lo que las membranas deben mantener estabilidad química, mecánica y durabilidad para su uso. Actualmente, se pone mayor atención al desarrollo de membranas con transporte e intercambio iónico que reúnan requerimientos específicos tales como:

- Elevada conductividad iónica
- Capacidad de cambio iónico
- Baja electro-ósmosis
- Estabilidad química



- Selectividad (o perm-selectividad) elevada
- Integridad mecánica (a aproximadamente 80°C)
- Estabilidad térmica elevada
- Baja permeabilidad al combustible
- Bajo costo.

La primera membrana polimérica que cumple con las características citadas para aplicaciones en celdas de combustible poliméricas la desarrolló en 1972, la empresa E.I. Dupont de Nemours & Co.; se trató de un polímero fluorocarbonado con una cadena principal PTFE con grupos éter perfluorovinil colgantes y con terminación en grupos sulfónicos ($-SO_3H$) o grupos iónicos carboxílicos, es la comercialmente conocida como Nafion®. (Figura 3).

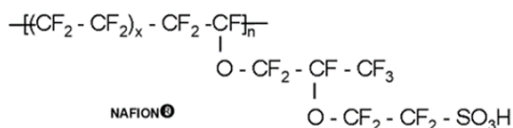


Figura 3 Estructura de Nafion®.

Clasificación de membranas poliméricas:

Membranas simples: se caracterizan por tener una distribución de grupos iónicos tipo continuo en la fase de la membrana. Los materiales más atractivos por su estabilidad química para la preparación de membranas simples utilizables en celdas de combustible se basan en polímeros perfluorocarbonados, como Nafion® y Flemion®. Polímeros no fluorados tales como poliésteres aromáticos, polibenzimidazoles, poliimidaz, polisulfonas, poli (aril éter sulfonas) y policetonas funcionalizadas con grupos ácidos, son opciones atractivas de membranas poliméricas. El poli-éter-éter-cetona (PEEK) sulfonado

(SPEEK) (Figura 4), se considera un sustituto

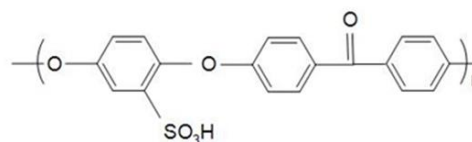


Figura 4 Estructura de SPEEK.

Membranas compuestas: se obtienen de una dispersión de resinas de intercambio iónico en un polímero que actúa como aglutinante, preparados con resinas de intercambio iónico comerciales del tipo poliestiren/divinilbenceno sulfonado, dispersas estas en polímeros perfluorados, tales como polifluoruro de vinilideno que actúa como aglutinante. También se han preparado mezclas de polielectrolitos y polímeros semicristalinos.

Membranas complejas ácido-base: se han desarrollado membranas basadas en polímeros con carácter de tipo básico (grupos éter, amino o imino), que pueden ser dopados con ácidos fuertes como el H_3PO_4 , siendo el polibenzimidazol (PBI) un polímero de este tipo. La inmersión de este tipo de membranas en ácido fosfórico incrementa notablemente su conductividad y su estabilidad térmica, con alta resistencia mecánica hasta los 200°C.

Membranas multicomponentes: las membranas multifuncionales o ultrafinas para ser usadas a temperaturas superiores a 100°C, se fabrican con una técnica de autoensamblaje capa por capa (LBL); un ejemplo es poliéter-etercetona sulfonada (SPEEK), como polianión polímero de poliuretano (PU) y el catión de líquido iónico (IL) 1-butil-3-metilimidazol (bmim⁺), como policationes. Después de la deposición de 100 capas, se obtienen las membranas de (SPEEK/PU/SPEEK/bmim)₁₀₀. Al final, las membranas de (SPEEK/PU/SPEEK/bmim)₁₀₀



se dopan con moléculas de ácido fosfórico (PA). La preparación a partir de la deposición alternativa de pequeñas moléculas promete la posibilidad de combinar propiedades multi-componentes.

De esta manera, las posibles combinaciones experimentales, tanto en los catalizadores como en las membranas de polímero llevan como objetivo un alto desempeño en sus funciones.

Aplicaciones de la PEMFCs en el transporte vehicular.

Las celdas de combustible poliméricas forman parte de un sistema de generación de electricidad, almacenamiento y aplicaciones en diversos dispositivos que se conoce como balance de planta. En los arreglos o *stacks* de celdas de combustible, se requiere un manejo adecuado del calor liberado por las reacciones exotérmicas en la celda y del manejo del agua que se produce. El manejo del agua es un factor clave en la operación y desempeño de la celda, la cual se ve afectada por el exceso de agua que se acumula en los canales de flujo del oxígeno y que bloquea el transporte del gas internamente. La corriente y el voltaje en una celda de combustible no están regulados por lo que se requiere de una electrónica con un convertidor DC-DC como una interfase entre la celda de combustible y la carga, y un módulo de baterías como un sistema de almacenamiento de la electricidad producida. La integración de los diferentes componentes auxiliares, humidificación y presión de alimentación de gases, así como monitoreo de temperatura de la celda, requieren de un sistema de control para mantener el comportamiento dinámico en condiciones de operación óptima cercano a valores de corriente-voltaje de la curva de desempeño de la celda. La figura 5 muestra de forma

esquemática la integración de celda de combustible, cargador de baterías con sistema de manejo de baterías (BMS) y distribución de cargas hacia motores eléctricos de un transporte vehicular.

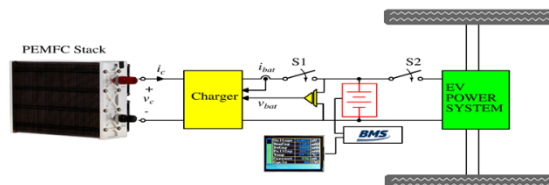


Figura 5. Diagrama esquemático de un transporte vehicular híbrido con celda de combustible-baterías recargables.

Tomada de: desarrollo prototipo Sicarú-Cinvestav.

En los autos eléctricos existe también un control de velocidad electrónico que ajusta el movimiento de cada rueda en la que se encuentran integrados motores eléctricos de la parte delantera y trasera de la unidad.

La tecnología de hidrógeno y celdas de combustible en el transporte vehicular es un desarrollo multidisciplinario y representa una opción de movilidad de bajo carbón al provenir de fuentes de energías renovables, se complementa con el transporte vehicular eléctrico de baterías e incluso superarlas por las limitaciones de estas con respecto al peso, intervalos de conducción y recarga en largos trayectos.

Referencias

- Alfaro López, H.M., Valdés Madrigal, M.A., Rojas Chávez, H., Cruz Martínez, H., Padilla Islas, A., Tellez Cruz, M., Solorza Feria O. (2020) "A Trimetallic Pt₂NiCo/C Electrocatalyst with Enhanced Activity and Durability for Oxygen Reduction Reaction", *Catalysts*, 10(2), 170. Disponible: <https://doi.org/10.3390/catal10020170>



- Alfaro López, H.M., Solorza Feria, O. (2020). Membranas Poliméricas para Celdas de Combustible. *Contribuciones destacadas en conversión y almacenamiento de energía*. (En prensa). En H Cruz Martínez, H.M. Alfaro López, M.G. Salinas Juárez, M. Tellez Cruz. Editorial CINVESTAV.
- Asensio, J. A, Borrós, S., Gómez-Romero, P. (2004). "Proton-conducting membranes based on poly (2, 5-benzimidazole) (ABPBI) and phosphoric acid prepared by direct acid casting", *J. Membrane Sci.*, 241, 89–93.
- Bing, Y., Liu, H., Zhang, L., Ghosh, D., Zhang, J. (2010) "Nanostructured Pt-alloy electrocatalysts for PEM fuel cell oxygen reduction reaction", *Chem. Soc. Rev.* 39, 2184-2202. Disponible: <http://doi.org/10.1039/b912552c>
- Bönnemann, H., Braun, G., Brijoux, W., Brinkmann, R., Tilling, A.S., Seevogel, K., Siepen, K. (1996) "Nanoscale colloidal metals and alloys stabilized by solvents and surfactants Preparation and use as catalyst precursors", *J. Organomet. Chem.* 520 143–162. Disponible: [http://doi.org/10.1016/0022-328X\(96\)06273-0](http://doi.org/10.1016/0022-328X(96)06273-0)
- Corti H.R & González E.R. (2014). *Direct Alcohol Fuel Cells*. Springer.
- Che, Q., Fan, H., Duan, X., Feng, F., Mao, W., Xue Han, X. (2018). "Layer by layer self-assembly fabrication of high temperature proton exchange membrane based on ionic liquids and polymers", *J. Mol. Liq.*, 269, 666–674. Disponible <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.030>
- Cruz Martínez, H. (2018). *Diseño de nanocatalizadores trimetálicos con bajo contenido de Pt para la reacción de reducción de oxígeno: Estudio teórico-experimental* (Tesis de doctorado). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, CDMX, México.
- Flores Rojas, E. (2018). *Nanocatalizadores M-Pt (M= Co, Ni) y BM-Pt (BM= Co30- Ni70, Co50-Ni50 y Co70-Ni30) sintetizados por Mecanoquímica y desplazamiento galvánico para la reacción de reducción de oxígeno en Celdas de Combustible Poliméricas*. (Tesis de doctorado). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, CDMX, México.
- Häkkinen, H. (2012) "Nanoclusters as Superatoms Insights from Theory and Computations", *Front. Nanosci.*, 3, 129-157. Disponible: <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-096357-0.00004-2>
- Hoogers, G. (2003). *Fuel Cells Technology Handbook*. CRC.
- Imran, M. A., He, G., Wu, X., Yan, X., Li, T. & Khan A.-S. (2019). "Fabrication and characterization of sulfonated polybenzimidazole/sulfonated imidized graphene oxide hybrid membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cells", *J. Appl. Polym. Sci.*, 47892 – 47905. Disponible: <http://doi.org/10.1002/app.47892>
- Li, D, Lv, H., Kang, Y., Markovic, N.M., Stamenkovic, V.R. (2016) "Progress in the Development of Oxygen Reduction Reaction Catalysts for Low-Temperature Fuel Cells", *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, 7, 509-532. Disponible: <http://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-034526>
- López, M. L, Compañ, V., Garrido, J., Riande, E. & Acosta, J. L. (2001). "Proton Transport in Membranes Prepared from Sulfonated Polystyrene-Poly (vinylidene fluoride) Blends", *J. Electrochem. Soc.*, 148(9), Disponible E372-E377doi: 10.1149/1.1388631
- Markovic, N.M., Schmidt, T.J., Stamenkovic, V., Ross, P.N. (2001) "Oxygen Reduction Reaction on Pt and Pt Bimetallic Surfaces: A Selective Review", *Fuel Cells.*, 1, 105–116. Disponible: [http://doi.org/10.1002/1615-6854\(200107\)1:2<105::aid-fuce105>3.3.co;2-0](http://doi.org/10.1002/1615-6854(200107)1:2<105::aid-fuce105>3.3.co;2-0)
- Mazzapioda, L., Panero, S., Navarra M.A. (2019). "Polymer Electrolyte Membranes Based on Nafion and a Superacidic Inorganic Additive for Fuel Cell Applications", *Polymers*, 11(914) 1 – 10. Disponible: 10.3390/polym11050914
- Morozan, A., Joussetme, B., Palacin, S. (2011) "Low-platinum and platinum-free catalysts for the oxygen reduction reaction at fuel cell



- cathodes”, *Energy Environ. Sci.* 4, 1238-1254. Disponible: <http://doi.org/10.1039/c0ee00601g>
- Nasef, M. M (2014) “Radiation-grafted membranes for polymer electrolyte fuel cells: current trends and future directions”, *Chem. Rev.*, 114(24) 12278 – 12329
- Navarro, R. M., Peña M. A. & Fierro, J. L. G. (2007) “Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass”, *Chem. Rev.*, 107, 10, 3952–3991. Disponible: <https://doi.org/10.1021/cr0501994>
- Reyes Rodríguez, J.L. (2013). *Síntesis y caracterización de nanopartículas tipo Core-Shell, Cobalto – Platino como catalizador para la reacción de reducción de oxígeno* (Tesis de licenciatura). Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.
- Reyes Rodríguez, J.L., Cruz Martínez H., Tellez Cruz, M.M. Velázquez Osorio, A. Solorza Fera, O. (2018) “Recent contributions in the development of Fuel Cell Technologies in Sustainable Energy Technologies Book”. Taylor & Francis-CRC. ISBN 9781138034389.
- Reyes Rodríguez, J.L. (2018). *Estudio de la síntesis, caracterización y desempeño de nanocatalizadores poliédricos Ni-Pt y su aplicación como cátodos en celdas de combustible poliméricas* (Tesis de doctorado). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, CDMX, México.
- Rikukawa, M. & K. Sanui, (2000). “Proton-conducting polymer electrolyte membranes based on hydrocarbon. Polymers”, *Prog. Polym. Sci.*, 25(10), 1463-1502.
- Rodríguez, C., A., Díaz Bernabe, J.L., Citalán Cigarroa, S. Solorza Fera, O. (2018) *Development and applications of portable systems base on conventional PEM fuel cells, in Portable hydrogen energy systems: Fuel cell and storage fundamentals and applications*. Academic Press.
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi K. & Meinshausen, M. (2016) “Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C”, *Nature* 534, 631-639.
- Romanowski, W. (1969) “Equilibrium forms of very small metallic crystals”, *Surf. Sci.* 18 373–388. Disponible [http://doi.org/10.1016/0039-6028\(69\)90180-0](http://doi.org/10.1016/0039-6028(69)90180-0)
- Shao, M., Chang, Q., Dodelet, J.P., Chenitz, R. (2016) “Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction”, *Chem. Rev.*, 116, 6, 3594-3657. Disponible: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00462>
- Stamenkovic, V.R., Fowler, B., Mun, B.S., Wang, G., Ross, P.N., Lucas, C.A., Markovic, N.M. (2007). “Improved Oxygen Reduction Activity on Pt₃Ni (111) via Increased Surface Site Availability”, *Science* 315, 493–497. Disponible: <http://doi.org/10.1126/science.1135941>
- Sutharssan, T., Montalvao, D., Chen Y. K., Wang W.-C., Pisac, C. & Elemara, H. (2017) “A review on prognostics and health monitoring of proton exchange membrane fuel cell”, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 75, 440 – 450.
- Özaslan, M. (2012). *Oxygen Electroreduction on Core-Shell Nanoparticle Catalysts Prepared by Selective* (Tesis de doctorado). Facultad II - Matemáticas y Ciencias Naturales de la Universidad Técnica de Berlín, Berlín, Alemania.



Humanidades, Tecnología y Ciencia, del Instituto Politécnico Nacional

Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2010-0326124-14000-203 ISSN: 2007-1957

