

Materiales que impulsan la energía limpia: polímeros y arcillas, una combinación prometedora para celdas de combustible

Julieta Guzmán^a, Omar T. Guzmán^b, Tania E. Soto^a, Joel Vargas^a, Arlette A. Santiago ^{b*}

^a Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

^b Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

ABSTRACT

In this work is presented the synthesis and characterization of a polymer compound based on a polynorbornene dicarboximide modified with montmorillonite for its subsequent functionalization and study as proton exchange membranes (PEM) in fuel cells. The synthesis was carried out via ring-opening metathesis polymerization (ROMP), and the obtained polymer compound was characterized in terms of its structure, morphology, as well as its thermal and mechanical properties.

ARTÍCULO DIVULGATIVO



Recibido 20 octubre, 2025
Revisado 05 diciembre, 2025
Aceptado 01 febrero, 2026

KEYWORDS

ROMP, Polynorbornene dicarboximide, Montmorillonite, PEM

Introducción

La creciente demanda energética y la necesidad urgente por mitigar los efectos del cambio climático han impulsado el desarrollo de tecnologías capaces de producir energía de manera limpia y eficiente [1]. Entre las alternativas más prometedoras se encuentran las celdas de combustible (FC), dispositivos capaces de convertir la energía química de una reacción entre hidrógeno y oxígeno en energía eléctrica. Su alta eficiencia energética y la baja emisión de contaminantes colocan a las celdas de combustible en una posición estratégica para avanzar hacia sistemas energéticos más limpios, seguros y respetuosos con el ambiente [2,3]. Uno de los componentes más importantes de estas celdas es el electrolito, en las celdas tipo PEMFC (celdas de combustible con membrana de intercambio protónico) dicho electrolito es un polímero que permite el paso selectivo de protones, separa los gases reactivos y su funcionamiento es esencial para garantizar la eficiencia, durabilidad y estabilidad de la celda. Actualmente, los materiales más utilizados son los polímeros perfluorados como Nafion®, reconocidos por su alta conductividad protónica y resistencia química, aunque presenta limitaciones importantes como su alto costo, dependencia de agua para mantener su conductividad y reducción de eficiencia a altas temperaturas [3,4].

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Arlette Santiago  arlette_santiago@enesmorelia.unam.mx  Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/rtpsgh85>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

Las membranas compuestas están siendo utilizadas para desarrollar nuevos electrolitos conductores de protones para FC. La combinación de cargas inorgánicas en membranas poliméricas orgánicas ha sido objeto de gran interés en las últimas décadas debido a la influencia que ambas fases tienen sobre la conductividad protónica y estabilidad de las membranas, además de la disminución de los costos, el mejoramiento en la retención de agua y la disminución de la permeabilidad del combustible [5-8]. Las membranas de intercambio iónico con base en materiales compuestos orgánico-inorgánico ofrecen una excelente opción para mejorar los inconvenientes que presenta Nafion® y otros polímeros hidrocarbonados en su aplicación como en FC. En este sentido, en el presente trabajo se expone la síntesis y caracterización de un material compuesto formado por una polinorbornén dicarboximida y montmorillonita modificada, el cual posteriormente será funcionalizado para su aplicación como membrana de intercambio protónico en celdas de combustible. Las polinorbornén dicarboximidas son una familia de polímeros que se caracterizan por su elevada estabilidad térmica, excelente resistencia mecánica y su versatilidad química facilita ajustar sus propiedades. Las polinorbornén dicarboximidas sulfonadas exhiben alta selectividad a protones y una elevada conductividad iónica comparable con aquellas de las membranas de alto desempeño comerciales [9,10]. Con la formación de materiales compuestos con base en esta clase de polímeros se busca mejorar su desempeño para la aplicación indicada.

Metodología

Se sintetizó el anhídrido de norborneno-5,6-dicarboxílico (NDA) a través de la reacción de Diels-Alder entre anhídrido maleico y dicitropentadieno [11]. Posteriormente, el NDA se hizo reaccionar con una amina fluorada, empleando como medio de reacción ácido acético glacial, tal y como se muestra en la Figura 1. El producto obtenido se precipitó en agua y fue filtrado para ser recrystalizado en hexano. El monómero obtenido fue secado en un horno de vacío a 60°C toda una noche. Este monómero fue polimerizado vía metátesis con apertura de anillo utilizando catalizador de Grubbs de 2a generación, a temperatura ambiente y durante 1 hora (Figura 2). El polímero se precipitó en metanol acidificado, formando fibras que después fueron secadas en un horno a vacío a 70°C.

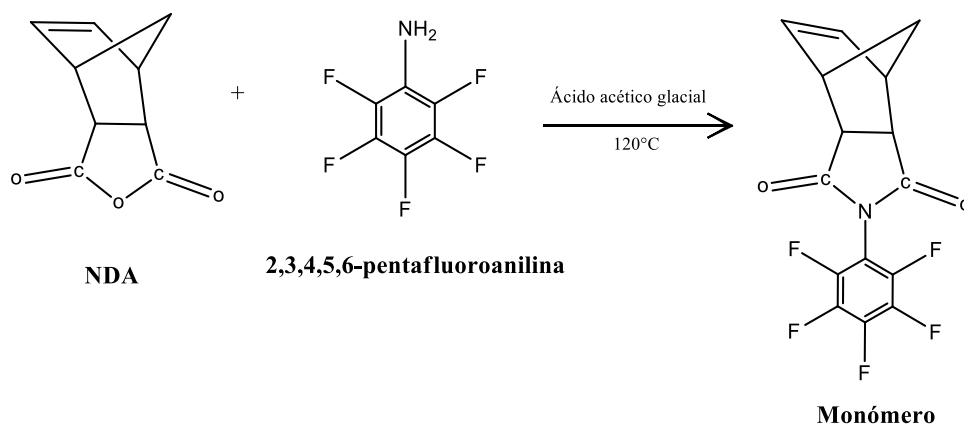


Figura 1. Síntesis del monómero norbornén dicarboximida

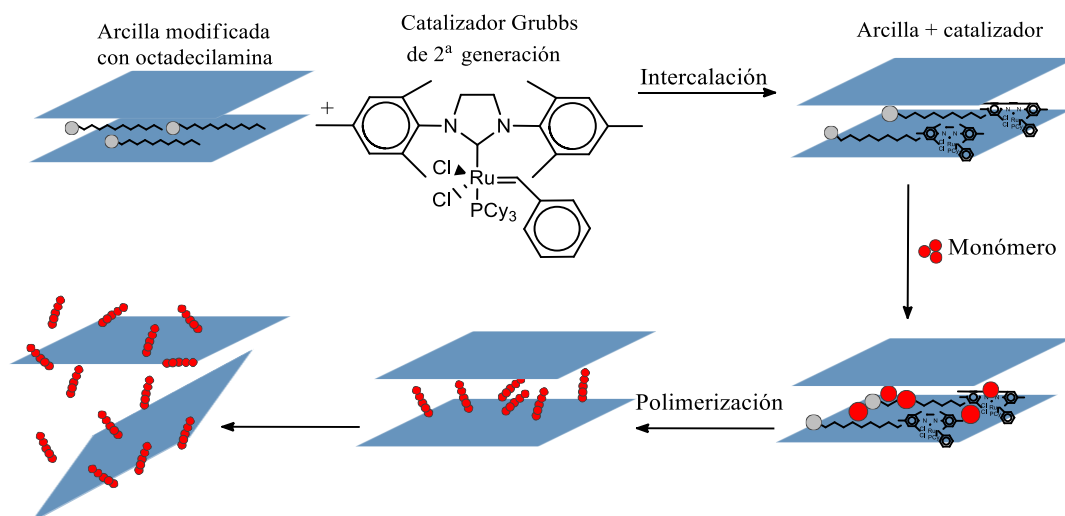


Figura 4. Síntesis del material compuesto polímero-montmorillonita modificada.

A partir del polímero y del compuesto polímero-arcilla se prepararon membranas densas utilizando el método de casting (Figura 5).

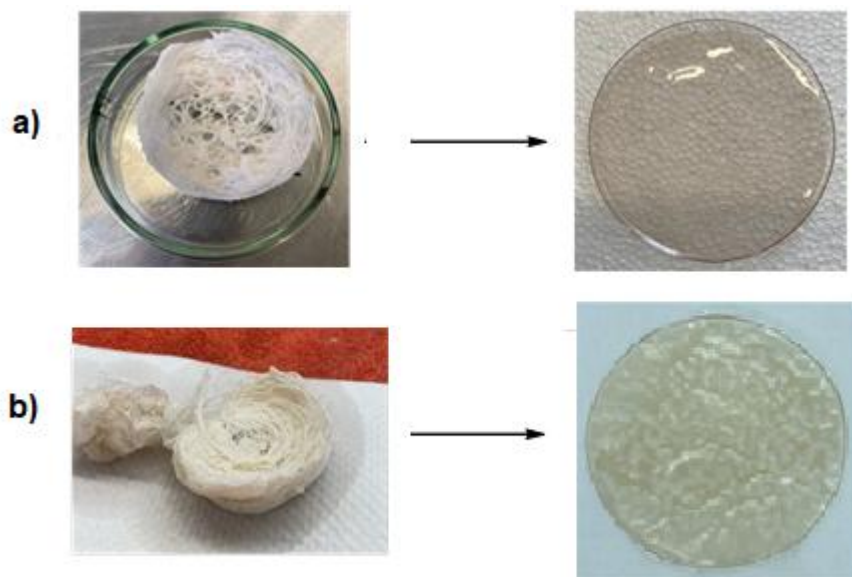


Figura 5. Imagen fotográfica de: (a) polímero prístino y su membrana y (b) material compuesto polímero-arcilla y su membrana

Resultados y discusión

Se llevó a cabo la síntesis del material compuesto a partir de la polimerización vía metátesis con apertura de anillo del monómero norbornén dicarboximida fluorado en presencia de la montmorillonita modificada con octadecilamina. La presencia de la arcilla durante la polimerización produce que disminuya la velocidad de esta reacción, haciendo necesario efectuarla a mayor temperatura y a tiempos más prolongados que los aplicados en reacciones sin la presencia de la arcilla. El material compuesto

obtenido tras varios días de reacción y precipitado en metanol, presentó un aspecto fibroso y a partir de éste fue posible la formación de películas densas, dimensionalmente estables y flexibles.

En la Figura 6a se muestra el patrón de difracción de rayos X de la membrana del material compuesto obtenido. En éste se observan, por un lado, un pico de difracción característico de la arcilla y por otro, picos de difracción asociados a las cadenas de polímeros que se separan debido a la presencia de la arcilla y también a aquellas cadenas de polímeros cuya distancia d se reduce debido a la compresión que ejercen otras cadenas adyacentes. Estos resultados confirman la formación del material compuesto con una microestructura que se tipifica como aglomerada dentro de la clasificación de esta clase de materiales. Asimismo, en la Figura 6b se presenta la micrografía de SEM del material compuesto, en ésta se observa una región lisa, uniforme y opaca, característica de las membranas de polinorboren dicarboximidas producidas vía casting. Por otra parte, dispersas sobre la superficie lisa es posible observar pequeñas regiones brillantes que corresponden a cúmulos del material inorgánico.

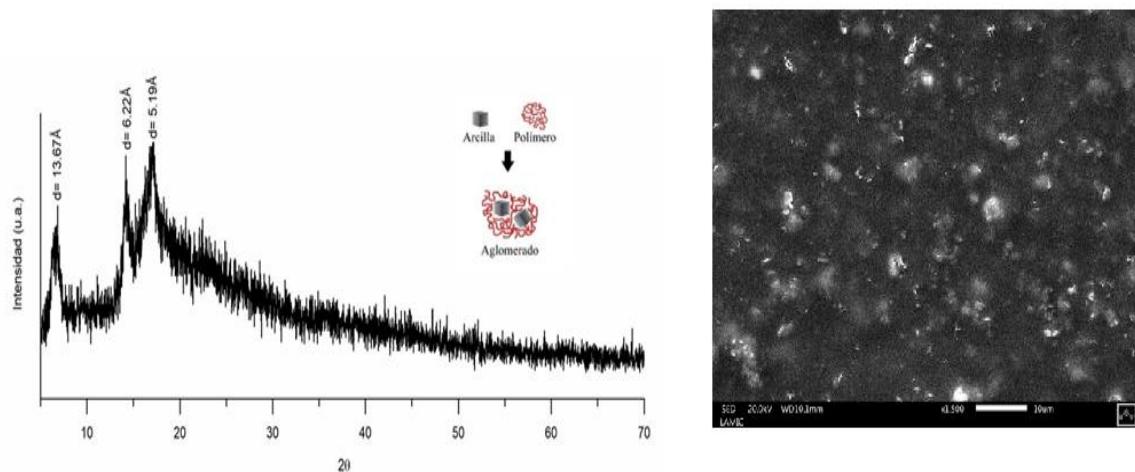


Figura 6. (a) Difractograma de rayos X y (b) micrografía de SEM del material compuesto

Los efectos de la incorporación de la arcilla en el polímero fueron evaluados a través de la comparación de las propiedades térmicas y mecánicas del material compuesto con respecto a las exhibidas por el polímero prístino. En la Figura 7 se muestran los termogramas obtenidos del análisis termogravimétrico efectuado a estos materiales, en ella se observa que el material compuesto exhibe una mayor temperatura de descomposición que el polímero prístino, lo que se atribuye a la alta estabilidad térmica del material inorgánico que refuerza al polímero ante su descomposición térmica.

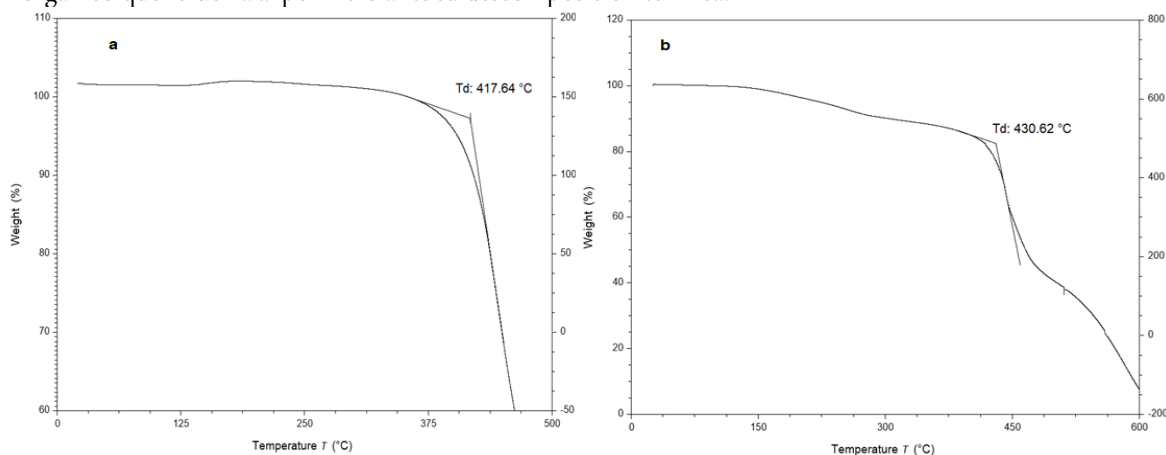


Figura 7. Análisis termogravimétrico del (a) polímero prístino y (b) material compuesto.

Por otra parte, en lo referente a las propiedades mecánicas, a partir de los ensayos de tensión efectuados a diferentes probetas de los materiales, se obtuvieron los diagramas de esfuerzo-deformación presentados en la **Figura 8**. A partir de estos es posible observar que la presencia de la arcilla redujo el módulo elástico y el esfuerzo máximo del polímero. Este comportamiento se atribuye a la estructura aglomerada obtenida del material compuesto lo que puede conducir a la segregación de fases, así como también a la probable disminución del peso molecular de la matriz polimérica.

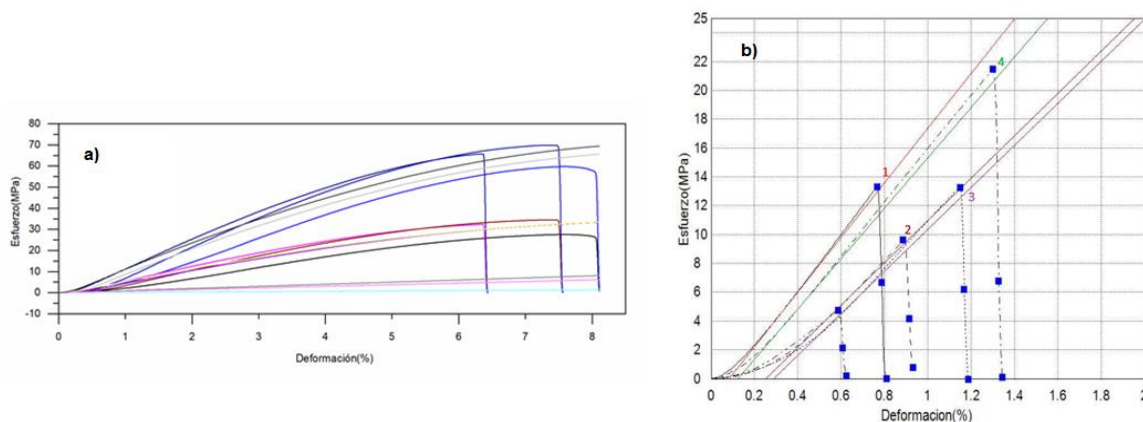


Figura 8. Diagrama de esfuerzo-deformación del (a) polímero prístino y (b) material compuesto.

Conclusiones

La polimerización por metátesis con apertura de anillo (ROMP) resultó un método útil para la síntesis de un nuevo compuesto polimérico basado en una norbornén dicarboximida y montmorillonita modificada con octadecilamina. El material compuesto obtenido tras varios días de reacción presentó un aspecto fibroso y a partir de éste fue posible formar membranas densas y dimensionalmente estables. La caracterización efectuada de dichas membranas corrobora la incorporación de la arcilla en la matriz polimérica y muestra que este material exhibe una estructura aglomerada. Asimismo, se encontró que la arcilla mejora la estabilidad térmica del polímero; sin embargo, sus propiedades mecánicas son inferiores a las del polímero prístino. Por lo tanto, para lograr una mejora integral en las propiedades de esta clase de materiales y potenciar su aplicación como membranas en celdas de combustible tipo PEMFC, previa funcionalización con grupos iónicos, es necesario profundizar en la investigación referente a mejorar la compatibilidad polímero-arcilla en favor de la obtención una estructura intercalada y/o exfoliada.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de la SECIHTI a través del Proyecto CBF-2025-I-2226 "Desarrollo de nuevos materiales compuestos con base en polinorbornén dicarboximidias-montmorillonita sulfonados para membranas de intercambio iónico". Responsable: Dra. Arlette Arizbe Santiago de la Cruz. Se agradece el apoyo financiero de la DGAPA-UNAM PAPIIT a través del proyecto IN105525.

Se agradece a Adriana Tejeda, Karla Eriseth Reyes Morales y Eliezer Hernández Mecinas por su invaluable apoyo en los análisis de DRX, térmicos y ensayos mecánicos, respectivamente.

Referencias

- [1] Singla, MK.; Nijhawan, P.; Oberoi, AS. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution*, 2021, 28(13), 15607-15626, doi: 10.1007/s11356-020-12231-8.
- [2] Alam Rimón, ST; Mourshed M.; Kibria, M.G. Proton exchange membrane fuel cells: advances in materials development, performance optimization, and future outlook. *Energy Conversion and Management* 2025,27, 101102, doi: 10.1016/j.enconman.2024.101102.

- [3] Zhu, Y.; Li, Y.C.; Liu, J.; He, J.; Wang, L.Y.; Lei, J.D. Recent developments in high-performance Nafion membranes for hydrogen fuel cells applications. *Petroleum Science* 2022, 19(3), 1371-1381, doi: [10.1016/j.petsci.2021.11.004](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.004)
- [4] Safranova, E.Y.; Lysova, A.A.; Voropaeva, D.Y.; Yaroslavtsev, A.B. Approaches to the Modification of Perfluorosulfonic Acid Membranes. *Membranes* 2023, 13(8), 721, doi: [10.3390/membranes13080721](https://doi.org/10.3390/membranes13080721)
- [5] Hwang, S.; Lee, H.G.; Jeong, Y.G.; Choi, C.; Hwang, I.; Song, S.; Nam, S.Y.; Lee, J.H.; Kim, K. Polymer Electrolyte Membranes Containing Functionalized Organic/Inorganic Composite for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Applications. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23(22), 14252, doi: [10.3390/ijms232214252](https://doi.org/10.3390/ijms232214252)
- [6] Choi, D.W. Electrochemical Analysis of Polymer Membrane with Inorganic Nanoparticles for High-Temperature PEM Fuel Cells. *Membranes* 2022, 12(7), 680, doi: [10.3390/membranes12070680](https://doi.org/10.3390/membranes12070680).
- [7] Wani, A.A.; Shaari, N.; Kamarudin, S.K.; Raduwan, N.F.; Yusoff, Y.N.; Khan, A.M.; Yousuf, S.; Ansari, M. N. M. Critical Review on Composite-Based Polymer Electrolyte Membranes toward Fuel Cell Applications: Progress and Perspectives. *Energy Fuels* 2024, 38, 18169-18193, doi: [10.2021/acs.energyfuels.4c02516](https://doi.org/10.2021/acs.energyfuels.4c02516).
- [8] Qian, B.; Zhang, R.; Said, A.; Xu, K.; Chen, K.; Komarneni, S.; Xue, D. Research progress on clay-based hybrid proton exchange membranes for fuel cells. *Mater. Horizon.*, 2025, 12, 8240-8260, doi: [10.1039/D5MH00720H](https://doi.org/10.1039/D5MH00720H)
- [9] Santiago, A.A.; Vargas, J.; Tlenkopatchev, M.A.; Loópez-González, M.; Riande, E. Electrochemical Performance of Membranes Based on Hydrogenated Polynorbornenes Functionalized with Imide Side Groups Containing Sulfonated Fluorinated Moieties, *Journal of Membrane Science*, 2012, 403-404, 121-128. doi: [10.1016/j.memsci.2012.02.034](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.034).
- [10] Santiago, A.A.; Vargas, J.; Tlenkopatchev, M.A.; Loópez-González, M.; Riande, E. Ion Exchange Membranes Based on Polynorbornenes with Fluorinated Imide Side Chain Group”, *International Journal of Chemical Engineering*, 2012, 1-11, doi: [10.1155/2012/835378](https://doi.org/10.1155/2012/835378).
- [11] Aranda-Suárez, I.; Corona-García, C.; Santiago, A.A.; López Morales, S.; Abatal, M.; López-González, M.; Vargas, J. Synthesis and Gas Permeability of Chemically Cross-Linked Polynorbornene Dicarboximides Bearing Fluorinated Moieties. *Macromol Chem Phys* 2019, 220, doi: [10.1002/macp.201800481](https://doi.org/10.1002/macp.201800481).