

Evaluación del HNBR como material polimérico sustituto para encapsulados en paneles fotovoltaicos de silicio

Jorge Armando de los Santos-Rodríguez⁴

Dulce Magdalena Martínez-Almendáriz¹

José Antonio González-Vázquez¹

Angela Elizabeth Peña-Barrientos²

Carlos Andrés Covarrubias-Gordillo³

Francisco José González-González^{3,§}

1 Universidad Tecnológica de la Región Centro de Coahuila. Carretera Monclova-Sabinas km 14.5, Monclova, Coahuila, México. CP. 25610.

2 Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía-CINVESTAV-Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica 1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, México. CP. 25900.

3 Facultad de Ciencias Químicas-Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V. Carranza s/n, esquina con Ing. José Cárdenas Valdés, Saltillo, Coahuila. México. CP. 25280.

4. Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarias, Universidad Autónoma de Coahuila. Carr. México km. 13. Ciudad Universitaria, Arteaga, Coahuila, 25350, México.

Autor para correspondencia: fgonzalezgonzalez@uadec.edu.mx.

Resumen

Actualmente el uso de las energías renovables concretamente la energía fotovoltaica ha llevado un crecimiento casi exponencial debido a la demanda energética cada vez intensa en el mundo. Lo anterior, ha conducido al ramo fotovoltaico a centrar sus esfuerzos en la eficiencia de los generadores fotovoltaicos. Un área de estudio de gran interés es la sustitución de materiales usados actualmente ya sea como encapsulantes o aislantes para la fabricación de los módulos fotovoltaicos de silicio. En este trabajo se llevaron a cabo pruebas de recubrimiento polimérico para celdas fotovoltaicas, utilizando el caucho nitrilo butadieno hidrogenado con la finalidad estudiar la viabilidad de su uso como encapsulante fotovoltaico. Se prepararon membranas del polímero mediante prensado a diferentes condiciones para obtener las propiedades óptimas deseadas de adhesión y transparencia. Finalmente, se realizaron pruebas de variables eléctricas a condiciones estándar de laboratorio (25 °C, 1000 W m⁻², 1.5 masas de aire). Los resultados de las mediciones validan el empleo del nitrilo butadieno hidrogenado como un polímero encapsulante para módulos fotovoltaicos, ya que este material muestra una mayor estabilidad térmica de más de 100 °C con respecto a encapsulantes convencionales como el etileno vinil acetato, sin afectar el paso de corriente eléctrica a través del material, lo que lo convierte en una opción más estable y duradera con potencial aplicación en celdas solares de mayor escala.

Palabras clave:

cauchos, energía solar, HNBR, paneles solares, silicio.

Los paneles fotovoltaicos están expuestos a una variedad de condiciones ambientales adversas que afectan su rendimiento y durabilidad. Entre los factores más críticos que pueden deteriorar su funcionamiento se encuentran la exposición prolongada a la radiación ultravioleta (UV), las variaciones extremas de temperatura, la humedad y la presencia de contaminantes atmosféricos. Estos elementos pueden provocar la degradación prematura de los materiales encapsulantes, afectando tanto la estabilidad mecánica como la eficiencia de conversión energética del módulo fotovoltaico (Ossa Arango, 2017).

Para atender la problemática antes mencionada, los encapsulantes poliméricos desempeñan un papel esencial en la protección de las celdas solares, ya que previenen la infiltración de oxígeno y humedad, minimizan los efectos de la radiación UV y contribuyen a la disipación térmica dentro del módulo. La elección del material de encapsulación en módulos fotovoltaicos es crucial para garantizar tanto la eficiencia energética como la durabilidad del sistema.

Actualmente, el (EVA) es el material más utilizado como encapsulante debido a su bajo costo, propiedades ópticas adecuadas y su capacidad adhesiva (Säckl *et al.*, 2024). Sin embargo, su susceptibilidad al amarillamiento, la degradación térmica y la pérdida de propiedades mecánicas con el tiempo han generado la necesidad de explorar nuevos materiales con mejores características de resistencia y durabilidad.

Sin embargo, estudios han señalado que bajo condiciones ambientales adversas, como lo son las altas temperaturas, elevada humedad y alta irradiancia ultravioleta, factores ambientales típicos en diversas regiones del país, el EVA es susceptible al amarillamiento, la degradación térmica y la pérdida de propiedades mecánicas con el tiempo, afectando la eficiencia y vida útil de los módulos fotovoltaicos (Agroui y Collins, 2003). Esto ha generado la necesidad de explorar nuevos materiales con mejores características de resistencia y durabilidad.

En este sentido, el caucho nitrilo butadieno hidrogenado (HNBR) surge como una alternativa prometedora debido a su notable estabilidad térmica y química, su alta resistencia a la radiación UV y su capacidad de adhesión. Este elastómero ha sido ampliamente empleado en sectores industriales como el automotriz y aeroespacial, donde se requiere una elevada resistencia al calor, a los solventes y a la oxidación. A pesar de su considerable mayor costo respecto al EVA, su comportamiento en aplicaciones de alto rendimiento sugiere que podría desempeñar un papel clave en la mejora de los encapsulantes de celdas fotovoltaicas, prolongando su vida útil y reduciendo los efectos negativos de la degradación ambiental (Pazur, 2005).

Estudios recientes han demostrado que los materiales poliméricos avanzados pueden contribuir significativamente a la optimización de la eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos. Los encapsulantes no solo protegen las celdas solares de los factores ambientales, sino que también influyen en la transmisión de la luz y en la disipación del calor, lo que impacta directamente en el rendimiento global del sistema. Un encapsulante con mayor estabilidad térmica y química puede minimizar la pérdida de eficiencia con el tiempo y mejorar el desempeño del módulo en condiciones climáticas adversas.

México posee un enorme potencial en energía solar, con aproximadamente el 70% de su territorio recibiendo una irradiación superior a $4.5 \text{ kW h m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, lo que lo convierte en un país muy soleado. Esto implica que, utilizando la tecnología fotovoltaica actual, una planta solar de 25 km^2 en cualquier lugar del estado de Chihuahua o el desierto de Sonora (ocupando el 0.01% de la superficie de México) podría proporcionar toda la electricidad demandada por el país (Juárez y Urdiales, 2022).

En cuanto al uso de paneles solares en el sector agrícola, la agrovoltaica, también conocida como agrofotovoltaica o agrisolar, es una técnica que combina la producción de energía solar con la agricultura. Esta práctica permite el uso dual de la tierra para la generación de energía y el cultivo de plantas, ofreciendo beneficios como la reducción de la evaporación del agua y la protección de los cultivos contra condiciones climáticas adversas (Ordaz, 2022).

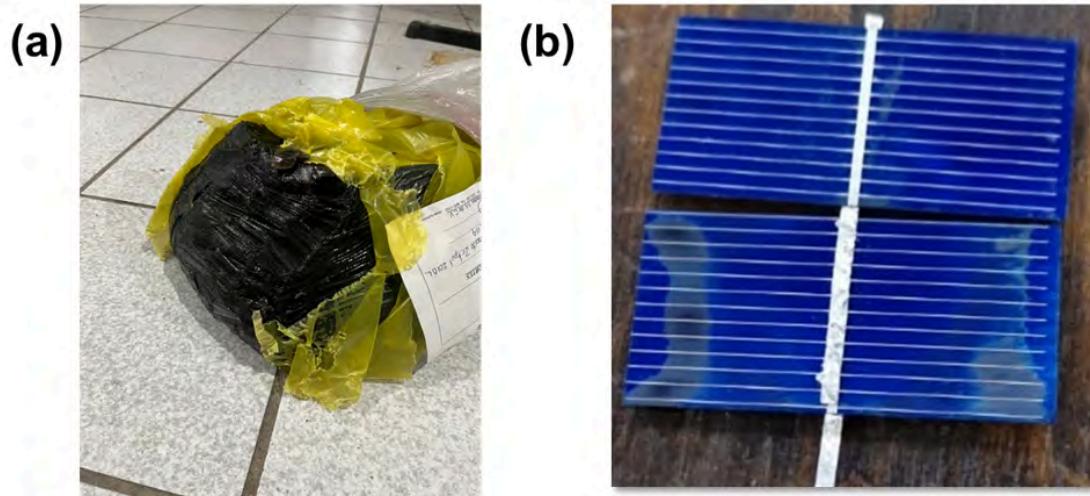
Aunque la adopción de sistemas agrovoltaicos en México aún es incipiente, se han identificado áreas con alto potencial para su implementación. Por ejemplo, estados como Baja California, Yucatán y Chihuahua presentan condiciones favorables para el desarrollo de proyectos que

integren la generación de energía solar con actividades agrícolas (Gaona-Ponce *et al.*, 2021). Estos sistemas podrían beneficiar a las regiones rurales, donde la agricultura es la principal actividad económica y el acceso a la electricidad aún es limitado.

El objetivo general de esta investigación es evaluar el desempeño del caucho nitrilo butadieno hidrogenado (HNBR) como material encapsulante en paneles fotovoltaicos de silicio, analizando su estabilidad térmica, mecánica y su resistencia a la degradación ambiental. Se escudriño, para determinar su viabilidad como sustituto del en aplicaciones fotovoltaicas, explorando su capacidad para mejorar la durabilidad y la eficiencia de los módulos solares en comparación con los materiales encapsulantes convencionales.

Se empleó el HNBR con nombre comercial Zetpol 2010 L obtenido del proveedor Suministro de Especialidades SA de CV (Figura 1a). Se empleó EVA comercial marca Zanchen del proveedor Guangzhou Zanchen New Material Technology Co., Ltd. Se utilizaron celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino con una eficiencia del 17% (Figura 1b) bajo condiciones de prueba estandarizadas, asegurando una comparación precisa entre las diferentes configuraciones y tipos de encapsulante.

Figura 1. Fotografías del HNBR comercial (a) y celdas de silicio monocristalino (b)



Metodología. Las membranas de HNBR fueron fabricadas mediante un proceso de prensado, controlando variables como la temperatura y el tiempo de procesamiento para obtener una película uniforme con un espesor de 0.6 mm. Este valor fue elegido para mantener la comparabilidad con el EVA comercial y evaluar su comportamiento en condiciones similares. Se fabricaron membranas de HNBR en una prensa manual Rositek aplicando un tratamiento térmico a 175 °C sin presión durante 2 min, posteriormente se aplicó una presión de 2 t a 218 °C durante 4 min y para finalizar un tiempo de enfriamiento de 2 min.

Las propiedades térmicas del HNBR fueron analizadas a través de técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA). El análisis de DSC se realizó con un calorímetro diferencial de barrido marca TA Instruments modelo Q-100 en un rango de temperaturas de -80 °C a 150 °C y el TGA se realizó en un equipo TA Instruments Q-500 y se realizaron pruebas a temperaturas desde temperatura ambiente hasta 800 °C. Ambos análisis se realizaron en atmósfera de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C min.

Estas pruebas permitieron evaluar su comportamiento estructural frente a cambios de temperatura y determinar su temperatura de transición vítrea (T_g), así como la degradación de su estructura polimérica bajo condiciones de alta temperatura. La aplicación y fijación de las membranas de HNBR en las celdas se llevó a cabo mediante aplicación de calor en un horno de secado marca

Workshore, modelo 2608, a una temperatura de 170 °C y una velocidad de banda de secado de 100 rpm que fueron las condiciones óptimas para la aplicación del encapsulante.

Se compararon las propiedades mecánicas y de adhesión de HNBR con EVA, obteniendo cinco celdas que se utilizaron como modelo para llevar a cabo su caracterización eléctrica. Las medidas eléctricas consistieron en lecturas del voltaje y la corriente generada por la misma celda, empleando una carga con una resistencia de 1 Ω con capacidad para disipar 5 W de potencia; esto bajo diferentes condiciones ambientales de iluminación solar y así poder evaluar el impacto del encapsulante en el desempeño eléctrico del módulo. La potencia de salida de la celda utilizada fue de 3.5 W bajo condiciones estándar de prueba.

Se utilizó un sistema de adquisición de datos basado en LabVIEW, el cual permitió registrar las variaciones en el desempeño eléctrico de los módulos encapsulados con HNBR en comparación con los encapsulados con EVA. Esta técnica facilitó la recopilación de datos en tiempo real, permitiendo un análisis detallado del impacto del material en la eficiencia del panel fotovoltaico.

Los datos obtenidos en estas pruebas permitieron realizar una comparación cuantitativa entre el desempeño del HNBR y el EVA, determinando la viabilidad del HNBR como material alternativo para encapsulantes en paneles fotovoltaicos. Finalmente, se resume esquemáticamente la metodología seguida a lo largo de este trabajo (Figura 2).

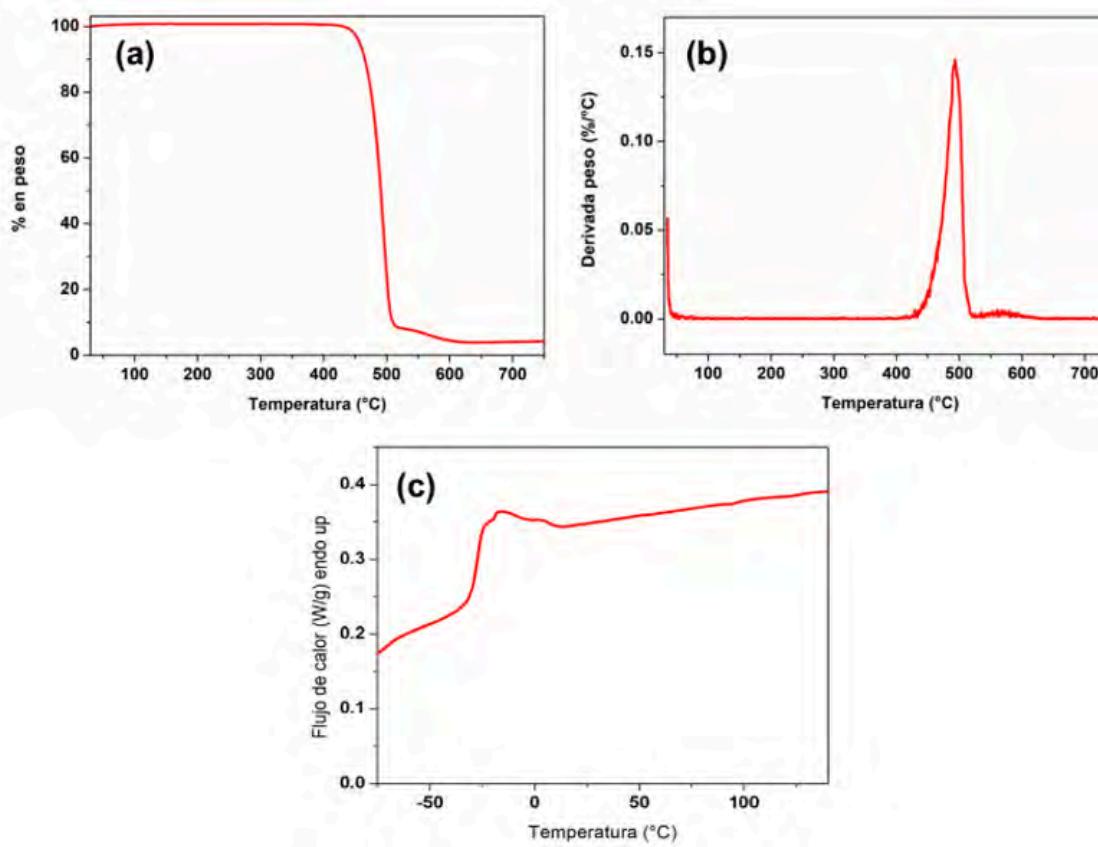


Figura 2. Esquema de la metodología realizada.

Propiedades térmicas del HNBR

La Figura 3 mostró la caracterización térmica del HNBR. La Figura 3a presentó la curva de TGA, la cual indica que el HNBR inicia su degradación térmica a temperaturas superiores a 450 °C. Para obtener información más precisa de la degradación térmica se representa la derivada de la pérdida de peso (Figura 3b), en donde se observó que el pico de mayor descomposición, en el cual se registra el porcentaje máximo de pérdida de peso, se presenta a aproximadamente 450 °C.



Figura 3. Análisis térmico del HNBR: a) curva de TGA; b) derivada de la pérdida de peso y c) curva de DSC.

Finalmente, se muestra la curva de DSC (Figura 3c). Esta curva demuestra la naturaleza amorfía del caucho y que presenta una temperatura de transición vítreo de -26 °C. Este valor indica que el material conserva su flexibilidad incluso a bajas temperaturas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos con condiciones climáticas adversas. Propiedades como su Tg y estabilidad térmica convierte al HNBR en una opción viable para recubrimientos en celdas fotovoltaicas, donde la estabilidad térmica y la resistencia mecánica son esenciales.

Este comportamiento evidencia una estabilidad térmica significativamente mayor en comparación con el EVA, el cual comienza a degradarse de acuerdo con la literatura a una temperatura alrededor de los 300 °C (Genesca, 2014). En contraste, los datos presentados demuestran que el HNBR presenta una estabilidad por encima de los 450 °C. Esta propiedad convierte al HNBR en un material altamente resistente al calor, alternativo al EVA en aplicaciones donde se requiere una mayor durabilidad y estabilidad térmica, como en recubrimientos poliméricos para celdas fotovoltaicas.

La estabilidad térmica es esencial, ya que la eficiencia de los paneles solares disminuye con el aumento de la temperatura. Se ha observado que cada incremento de 1 °C en la temperatura ambiente puede reducir la eficiencia de la celda entre un 0.25% y un 0.5%, dependiendo del material utilizado. Un encapsulante con mayor resistencia térmica, como el HNBR, podría mitigar este efecto adverso (Espinosa-Ramírez *et al.*, 2023).

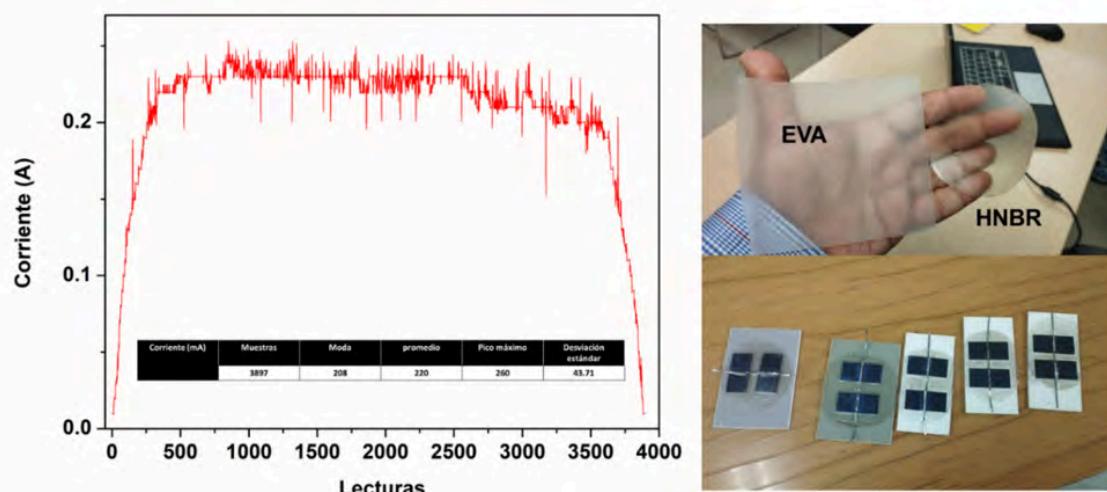
Además de la estabilidad térmica, la resistencia a la humedad y la radiación ultravioleta son factores críticos en la durabilidad de los módulos fotovoltaicos. La exposición prolongada a la humedad puede provocar corrosión y delaminación, mientras que la radiación UV puede degradar el encapsulante, reduciendo la transmisión óptica y por ende, la eficiencia del módulo.

Aunque el EVA ofrece ciertas ventajas, su susceptibilidad a estos factores limita su desempeño a largo plazo (Säckl *et al.*, 2024). El HNBR, por su parte, está reportado que presenta una mayor resistencia a la degradación por humedad y UV, lo que podría traducirse en una vida útil más prolongada y un mantenimiento de la eficiencia energética (Agroui *et al.*, 2016).

Ensayos en celdas fotovoltaicas

Los resultados de las mediciones de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales se presentan a partir de un total de 3987 mediciones, se obtuvo una corriente promedio generada por la celda de 220 mA, con picos de 260 mA y una moda de 208 mA en las mediciones (Figura 4). Estos resultados sugieren que el paso de corriente a través del polímero HNBR es comparable a la de otros materiales comúnmente utilizados en la industria como el EVA cuyos valores oscilan entre 210 y 240 mA (Badiee *et al.*, 2016).

Figura 4. Medidas de corriente en celdas fotovoltaicas (izquierda) y fotografías de la transparencia de los encapsulantes y celdas fabricadas (derecha).



Los datos recopilados con el sistema LabVIEW indicaron que los módulos encapsulados con HNBR mantuvieron una salida de potencia estable a lo largo del tiempo, incluso después de mantenerse un año a la intemperie. Esto sugiere que el HNBR no solo mejoró la durabilidad del encapsulante, sino que también permite mantener un desempeño eléctrico óptimo.

La capacidad del HNBR para mantener un desempeño adecuado en la generación de energía sugiere su viabilidad como recubrimiento polimérico en aplicaciones fotovoltaicas. Este desempeño, alineado con los resultados del modelado, refuerza la idea de que el HNBR no solo protege las celdas, sino que también optimiza su operación al permitir un nivel de transparencia similar al de los materiales ya establecidos en el mercado.

Para esto, en la Figura 5 se muestran fotografías de las celdas preparadas con HNBR y EVA. En la Figura 5 se observó que el nivel de transparencia entre el HNBR y el EVA son muy similares e incluso mayor la transparencia del HNBR. Dicha similitud sugirió un comportamiento óptico equivalente, respaldado por la eficiencia de generación observada en las celdas y la comparación directa de los prototipos evaluados.

Figura 5. Fotografías de las celdas fotovoltaicas con EVA y HNBR.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el HNBR es un material viable y altamente competitivo como encapsulante para celdas fotovoltaicas de silicio. En comparación con el EVA, el HNBR presentó una estabilidad térmica superior, con temperaturas de degradación que superaron los 450 °C frente a los 300 °C del EVA. Además, las pruebas eléctricas mostraron un desempeño ligeramente superior del HNBR respecto al EVA, lo que se traduce en una posible mejora en la eficiencia operativa bajo condiciones estándar.

Por otra parte, el HNBR presentó una transparencia óptica comparable a la del EVA y conservó sus propiedades físico-químicas tras un año de exposición ambiental, lo cual confirmó su resistencia al envejecimiento. Estas características posicionan a este material como una alternativa para sustituir al EVA en aplicaciones fotovoltaicas exigentes, con el potencial de extender la vida útil de los módulos y optimizar su rendimiento en condiciones ambientales severas.

Bibliografía

- 1 Agroui, K. and Collins, G. 2003. Characterization of EVA encapsulant material by thermally stimulated current technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 80(1):33-45. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(03)00112-0).
- 2 Agroui, K.; Jaunich, M. and Arab, A. H. 2016. Analysis techniques of polymeric encapsulant materials for photovoltaic modules: situation and perspectives. *Energy Procedia*. 93:203-210. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.07.171>.
- 3 Badiee, A. I.; Ashcroft, I. A. and Wildman, R. D. 2016. The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate is used as a solar panel adhesive and encapsulant. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 68:212-218. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.008>.
- 4 Espinosa-Ramírez, B. H. A.; Garrido-Hernández, A.; García-Domínguez, G.; Vargas-León, E. A. and Castillo-Minjarez, J. M. A. 2023. Efecto de la temperatura en la eficiencia de

- paneles fotovoltaicos. Pädi boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI. 11(5):184-190. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iespecial5.11841>.
- 5 Gaona-Ponce, B.; Altamirano-Cárdenas J. R.; Ocampo-Ledesma, J. G. y López-Canteños, G. J. 2021. Influencia de la actitud, calidad y satisfacción de la energía fotovoltaica en la agricultura. Revista Ingeniería Agrícola. 11(2):45-54.
 - 6 Genesca M. M.; Marin, R. M. R. 2014. Compuesto etileno acetato de vinilo (EVA) reforzado con neumáticos fuera de uso (GTR) propiedades dieléctricas, mecánicas y térmicas. Afinidad LXXI. 71(566):101-111.
 - 7 Juárez-Luna, D. y Urdiales, E. 2022. Participación de la electricidad fotovoltaica en México hacia el año 2050: un estudio Delphi. The Anáhuac Journal. 22(2):72-79. <https://doi.org/10.36105/theanahuacjour.2022v22n2.03>.
 - 8 Ordaz-Rivera, G. 2022. Sustentabilidad de la agricultura en México mediante el uso de energía solar fotovoltaica en los sistemas de riego. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 61-91 pp. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000833537>.
 - 9 Ossa-Arango, V. 2017. Ensamble y caracterización de un panel solar fotovoltaico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. 46-57 pp. <https://repositorio.utp.edu.co/handle/11059/7616>.
 - 10 Pazur, R. J. 2005. Improving processability with low mooney HNBR for Automotive Applications. 3(5):1-9. <https://www.rubbernews.com/article/20050101/DATA01/301019996>.
 - 11 Säckl, G.; Wallner, G. M.; Duchoslav, J.; Tiefenthaler, M. and Stifter, D. 2024. Advanced analysis of ethylene vinyl acetate copolymer materials for photovoltaic modules. Polymer Testing. 132:108381. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108381>.



Evaluación del HNBR como material polimérico sustituto para encapsulados en paneles fotovoltaicos de silicio

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc.
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 00 June 2025
Date accepted: 00 August 2025
Publication date: 15 October 2025
Publication date: Sep-Oct 2025
Volume: 16
Issue: esp30
Electronic Location Identifier: e4054
DOI: 10.29312/remexca.v16i30.4054
Article Id (other): 00017

Categories

Subject: Nota de investigación

Palabras clave

Palabras clave

cauchos
energía solar
HNBR
paneles solares
silicio

Counts

Figures: 5

Tables: 0

Equations: 0

References: 11