

Evaluación de un poli (líquido iónico) como catalizador de la reacción de alquilación entre isobutano/buteno utilizando como reactivos corrientes de refinería

Mercedes Bazaldúa Domínguez

Araceli Vega Paz

Diego Guzmán Lucero

José Gonzalo Hernández Cortéz

Rafael Martínez Palou

Instituto Mexicano del Petróleo

Artículo recibido en junio de 2023-evaluado-correcto y aceptado en marzo de 2024

Resumen

Esta investigación presenta la síntesis de un copolímero derivado de N-vinilpirrolidona (VP) y el líquido iónico de bromuro de 1-butil-3-vinylimidazolio utilizando una relación molar inicial de (30-70) respectivamente. La unidad repetitiva de VP se funcionalizó con grupos sulfónicos para obtener el catión pirrolidonio y contraiones cloruro ([PVP-SO₃H][Cl]). Al copolímero resultante, se le incorporaron sitios ácidos de Lewis con AlCl₃ en una relación mola $X_{\text{AlCl}_3}=0.75$. Con estas modificaciones el copolímero se usó para catalizar la reacción de alquilación entre el isobutano (I) y el 2-buteno (O) presente en una corriente proveniente de una refinería. Se utilizó una relación molar I/O de 9/1. Las estructuras químicas se caracterizaron con resonancia magnética nuclear de ¹H RMN, la resistencia térmica y el porcentaje de sulfonación del copolímero se obtuvieron por termogravimetría y, la microestructura del catalizador por microscopía electrónica de barrido (SEM). Se alcanzó una selectividad a trimetilpentanos (TMP) de 26 % y una conversión de 90 % utilizando el catalizador fresco; en una segunda reacción consecutiva se alcanzó 20 % de selectividad a TMP y 62 % de conversión a -6 °C, 260 psi y 1 h de reacción.

Palabras clave: Vinilpirrolidona, 1-vinil-3-butylimidazolio, alquilación isobutano/olefinas, catalizadores poliméricos.

Evaluation of a poly(ionic liquid) as a catalyst for the isobutane/butene alkylation reaction using refinery streams as reagents

Abstract

This research presents the synthesis of a copolymer derived from N-vinylpyrrolidone (VP) and 1-butyl-3-vinylimidazolium bromide ionic liquid using an initial molar ratio of (30-70) respectively. The repeating unit of VP was functionalized with sulfonic groups to obtain the pyrrolidonium cation and chloride counterions ([PVP-SO₃H][Cl]). Lewis acid sites were incorporated with AlCl₃ at a molar ratio of $X_{\text{AlCl}_3}=0.75$ to the resulting copolymer. With these modifications, the copolymer catalyzed the alkylation reaction between isobutane (I) and 2-butene (O) present in a refinery stream. The chemical structures were characterized by ¹H nuclear magnetic resonance (NMR), the thermal resistance and the sulfonation percentage of the copolymer were obtained by thermogravimetry, and the microstructure of the catalyst by scanning electron microscopy (SEM). A selectivity to trimethylpentanes (TMP) of 26 % and a conversion of 90 % were achieved using the fresh catalyst; in a second consecutive reaction, 20 % selectivity to TMP and 62 % conversion were achieved at -6 °C, 260 psi, and 1 h of reaction.

Keywords: Vinylpyrrolidone, 1-vinyl-3-butylimidazolium, alkylation isobutane/olefins, polymeric catalysts.

Introducción

De acuerdo con el Acta del Aire Limpio (CAA, por sus siglas en inglés), las refinerías mexicanas necesitan cambiar sus estrategias en la refinación para cumplir con las nuevas especificaciones en la composición de las gasolinas, que actualmente no cumplen con la calidad establecida en las normas técnicas nacionales. Para cumplir con las normas, se debe reducir el contenido de aromáticos, incrementar la cantidad de oxigenados MTBE (éter metil terbutílico) y TAME (ter-amil-metil-éter) y reducir la volatilidad mediante la disminución de la presión de vapor Reid. La gasolina de alquilatos ayuda a conseguir mezclas de gasolinas de mayor calidad, ya que incrementan los números de octano de motor (MON), y el número de octano de investigación (RON), no aporta aromáticos ni compuestos azufrados. Se prevé que en los próximos años se incrementará la demanda por las gasolinas de alquilatos debido a que son menos contaminantes y se incrementará el diseño de motores de combustión interna para mayores octanajes (Abdellatif et al. 2023).

La producción de alquilatos a nivel mundial es el 1.15 millones de barriles/día y con una tendencia creciente en la demanda de alquilato líquido como componente de la gasolina. Actualmente, la composición de la mezcla de gasolinas varía según la región y el alquilato se encuentra entre 12 y 20% vol.; se espera que su uso aumente en los próximos 10 años (Guzmán-Lucero et al. 2021). Entre los componentes de los alquilados, los más deseables son los TMP, que tienen RON superior a 100.

La producción de alquilatos a partir de la reacción entre el isobutano con 2-buteno en presencia de un catalizador ácido (H_0 entre -8.1 y -12.7) y temperaturas menores a 0 °C (Xu et al. 2020), minimizan las reacciones secundarias, como craqueo (subproductos C5-7) y polimerización (subproductos C₉+) (Liu et al. 2019). Los ácidos fluorhídrico y sulfúrico se usan como catalizadores de la reacción de alquilación en procesos industriales. Sus principales inconvenientes son la corrosividad y alta toxicidad y poseen puntos de ebullición muy cercanos a la temperatura ambiente. Actualmente su consumo elevado es cercano a la tercera parte del costo de operación total de la unidad de alquilación (Hsu y Robinson 2017).

Los líquidos iónicos (LI) representan a un nuevo grupo de disolventes y catalizadores, cuyas propiedades se pueden ajustar de acuerdo a las demandas fisicoquímicas de cada aplicación (Bui, Korth, y Jess 2012). Actualmente existen tecnologías a nivel industrial que producen gasolina de alquilatos que utiliza LI basados en cloroaluminatos, como

la tecnología ISOALKY, la cual fue desarrollada por Chevron y Honeywell UOP, a partir de sus investigaciones que iniciaron en 2004. También se conoce la tecnología de Ionikilyon™, con una planta piloto para producir 20 toneladas por año (TPA); mientras que PetroChina acondicionó una unidad de alquilación con LI para producir 65,000 TPA, Deyan Chemical Co, Ltd, PetroChina-Harbin y Sinopec Jiujiang producen 300,000 TPA, entre otras.

Los poli (líquidos iónicos) (PLI) son una clase de polímeros que se obtienen a partir de la polimerización de monómeros de LI vinílicos o son bifuncionales. En la literatura se han reportado catalizadores basados en PLI para la catálisis de la reacción de alquilación I/O, con resultados buenos en conversión y selectividad, entre los cuales se encuentran polímeros derivados de polietilamina (PEA) y poliéteres modificados con grupos sulfónicos (-SO₃H) (Xu et al. 2020; Yu et al. 2018), resinas de intercambio catiónico ácidas, o hidrogenosulfato de 1-(4-sulfobutil)-3-metilimidazolio [(HO₃SBu) MIM] HSO₄ (Bui et al. 2009).

En esta investigación se sintetizó y evaluó como catalizador para la reacción de alquilación I/O, a un copolímero derivado de vinilpirrolidona (VP) y Bromuro de 3-butil-1-vinilimidazolio (BVIM[Br]), que se funcionalizó con sitios ácidos de Brønsted y de Lewis.

Sección experimental

Materiales

Los reactivos 1-vinilimidazol (VIM, ≥ 99 %) y 1-bromobutano (99 %) se utilizaron para obtener monómero de bromuro de 1-vinil-3-butilimidazol (BVIM[Br]). Se utilizó N-vinil-2-pirrolidona (VP, ≥ 99 %) como monómero, diclorhidrato de 2,2'-azobis(2-metilpropionamida) (V50, 97 %) como iniciador de la polimerización y agua destilada como disolvente en reacciones de polimerización. Para obtener los grupos sulfónicos se utilizó el ácido clorosulfónico (99%), disuelto en diclorometano (99,8%), y se empleó acetato de etilo (99,8%) para eliminar los remanentes del ácido y finalmente se usó AlCl₃ (99,8%) para la incorporación de los sitios de Lewis.

Todos los reactivos se adquirieron de Sigma-Aldrich y se usaron tal como se recibieron. Además, se utilizó nitrógeno gaseoso de alta pureza (99,9 %) para desgasificar las reacciones de polimerización en disolución y evacuar el oxígeno de los reactores donde se llevó la reacción de alquilación.

Síntesis de copolímeros

Se sintetizó el 1-vinil-3-butimidazolio BVIM[Br] que se obtuvo mediante la reacción entre el 1-vinilimidazol (VIM) (1.06 mol) y 1-bromobutano (1.06 mol) a 35 °C por 24 h y agitación constante de 200 rpm. El polvo resultante se filtró, se lavó con hexano y se secó por 8 h a 40°C (Bazaldúa-Domínguez et al. 2023; Guzman-Lucero, Diego et al. 2017; Rebolledo-Libreros et al. 2017; Trujano Pérez, Ricardo Armando 2018).

La copolimerización se realizó en disolución acuosa entre la VP y el BVIM[Br] en una relación molar de 30% mol VP y 70% mol BVIM[Br] a 50°C y presión atmosférica, con 0.007 mol del iniciador V50 por cada mol de monómeros.

Incorporación de sitios de Lewis y Brønsted

La incorporación de los sitios de Brønsted se hizo utilizando ácido clorosulfónico como se describe en otros estudios (Shirini et al. 2016). La incorporación de grupos de Lewis se hizo con $AlCl_3$ usando una relación molar de $X_{AlCl_3}=0.75$. La relación molar de $AlCl_3$ se define en la Ecuación 1.

$$X_{AlCl_3} = \frac{\text{Moles de sal}}{\text{Moles de sal} + \text{Moles de PIL}} \quad (1)$$

Compuesto	H ₂	C6+/C5	propano	propileno	i-butano	n-butano	1-Buteno	Isobutileno	t-2-Buteno	c-2-Buteno	1,3-Butadieno
Composición másica (%)	0.3	0.004	0.206	0.543	88.33	2.088	2.793	0.917	2.933	1.862	0.022

Tabla 1. Composición de la mezcla de reacción de destilados intermedios del petróleo.

Resultados

En la **Figura 1** se presenta el espectro de ¹H RMN del copolímero VP-BVIM[Br] (30-70), al igual que las asignaciones de los protones, VP (Hemalatha et al. 2014) y BVIM[Br] (Guzmán-Lucero, Castillo-Acosta, y Martínez-Palou 2020): VP: ¹H NMR (D₂O, 600 MHz) δ 2.03 (dd, J= 7.4 Hz, 2H), 2.65 (t, J= 7.4 Hz, 2H), 3.71 (t, J= 7.2 Hz, 2H), 4.74 (t, J= 12.8 Hz, 2H), 6.99 (dd, J= 15.8, 9.1 Hz, 1H). BVIM[Br]: ¹H NMR (D₂O, 600 MHz) δ 1.06 (t, J=7.5 Hz, 3H), 1.48 (h, J=7.5 Hz, 2H), 2.29 – 2.20 (m, J=7.5 Hz, 1H), 4.40 (t, J= 7.0 Hz, 2H),

Caracterización

Los análisis de espectroscopia de ¹H RMN se realizaron en un espectrómetro Bruker Advance Neo de 600 MHz. Las propiedades térmicas se determinaron mediante análisis termogravimétrico de alta resolución (TGA) utilizando un equipo Netzsch STA 409. La caracterización por microscopia electrónica de barrido se llevó a cabo en un microscopio Philips XL 30, ESEM; el análisis de dispersión de energía en un microscopio EDAX, APEX Element.

El producto de alquilación (gas y/o líquido) se analizó por cromatografía de gases (Varían CP-3800 con detector FID) y análisis PIONA.

Evaluación catalítica

Las condiciones de evaluación aplicadas en este trabajo:

- Mezcla de gases I/O 9:1 destilados intermedios del petróleo (la composición se muestra en la **Tabla 1**).
- Reactor batch Parr
- Presión de 290 psi
- Temperatura -6 °C

5.67 – 5.54 (m, J= 15.5 Hz, 1H), 5.97 (dd, J= 15.5, 2.5 Hz, 1H), 7.32 (dd, J= 15.5, 8.7 Hz, 2H), 7.79 (8.7 Hz, 1H), 7.98 (8.7 Hz, 1H), 9.29 (8.7 Hz, 1H). La técnica de ¹H RMN permite hacer un monitorio de la formación del copolímero. Para estos materiales se monitorean los protones vinílicos, los cuales desaparecen en función del tiempo. Al completarse la reacción de polimerización desaparecen completamente los picos correspondientes a los protones vinílicos (5.67 y 7.32) (Bazaldúa-Domínguez et al. 2023), como se observa en el espectro, **Figura 1**.

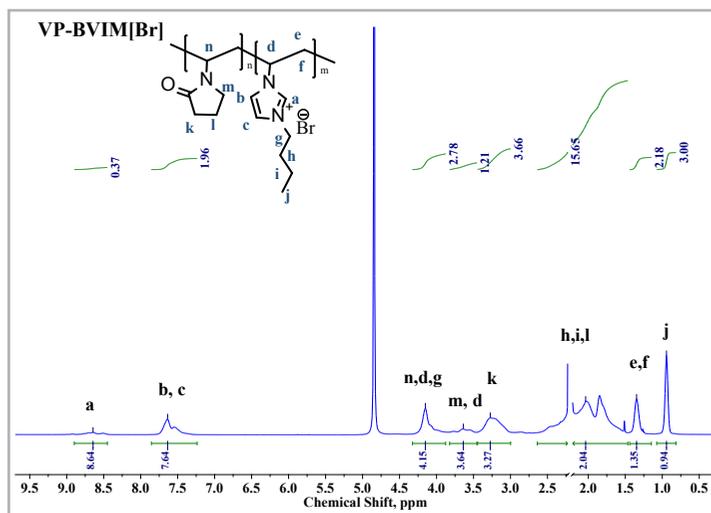


Figura 1. Espectro de ^1H de RMN del copolímero de VP- BVIM[Br] (30-70).

En la **Tabla 2**, se puede observar que los moles iniciales en la reacción (f_0) para los monómeros VP y BVIM[Br] son 30 y 70 respectivamente, y al finalizar la reacción la incorporación fue de $F_{VP}= 35$ y $F_{BVIM[Br]} = 65$, lo que significa que hubo una desviación del 5% de la composición ideal del copolímero, favoreciendo la incorporación de VP.

Polímero	Mero	f_0	F
P(VP-BVIM[Br])	VP	30	35
	BVIM [Br]	70	65

Tabla 2. Incorporación molar final de los monómeros al copolímero VP-BVIM[Br].

La caracterización térmica del copolímero (VP-BVIM[Br]) (30-70) y el copolímero funcionalizado con sitios de Brønsted [PVP-SO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70) se realizó por análisis termogravimétrico, TGA, la comparación de los termogramas de ambos polímeros se muestra en la **Figura 2**. El copolímero VP-BVIM[Br] (30-70) muestra dos pérdidas de peso, la primera asociada con la humedad con 9% pérdida de peso hasta 145°C, la segunda asociada a la descomposición de las unidades que la cadena principal de 73% hasta 252°C y un máximo en la primera derivada de

300°C. Por otro lado, el copolímero [PVP-SO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70) tiene una pérdida de peso adicional, la cual inicia en 155°C y corresponde a 18% de pérdida de peso asociada con la ruptura del enlace O-S de los grupos sulfónicos de las unidades que provienen de la VP (Mahshid Yosefzadeh 2016). Se puede observar que ambos copolímeros tienen una descomposición final en la misma temperatura, e incluso coinciden en el pico de la primera derivada. Lo que sugiere que, la estructura química del copolímero después de este evento térmico vuelve a su forma química inicial.

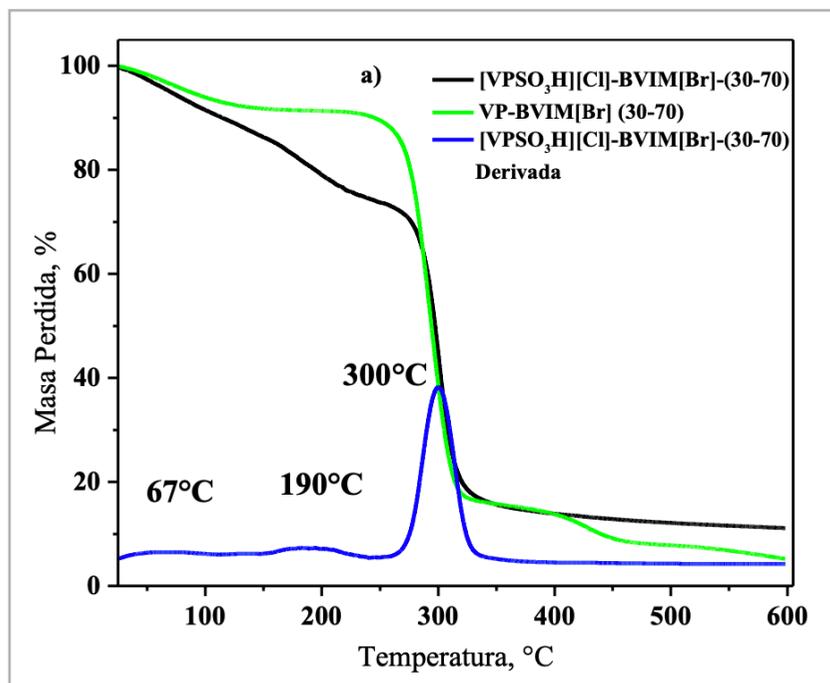


Figura 2. Análisis por TGA de los copolímeros VP-BVIM[Br] (30-70) y el [VP-SO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70).

Los catalizadores que presentan actividad para la reacción de alquilación de isobutano reportados en la literatura se evalúan con gases puros debido a la complejidad de la reacción; el catalizador propuesto se probó con la mezcla de reacción gaseosa de refinería de la Tabla 1.

En la **Tabla 3** se presentan las condiciones de evaluación y los resultados del [VP-SO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70) $X_{\text{AlCl}_3}=0.75$, en comparación con el H₂SO₄ y el AlCl₃. Se puede observar que el copolímero tiene una mejor selectividad a trimetilpentanos (TMP) que el H₂SO₄ (evaluado con la mezcla de gases I/O, 9:1); es decir, el ácido inorgánico logra una selectividad a

TMP 12%, pero al emplear el catalizador [VPSO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70) $X_{\text{AlCl}_3}=0.75$, la selectividad a TMP es de 26% y con una conversión del 90%, la cual fue 20% mayor que la conversión con H₂SO₄. Una vez que se hace el reuso del catalizador, sin hacer ningún tratamiento previo, se logró obtener una conversión del 62% y una selectividad a TMP de 20%, es decir, la selectividad se mantiene en el mismo rango que el catalizador fresco, (Tabla 3). Con respecto al AlCl₃ se puede observar que la conversión es mayor (91.4%) pero no alcanzó la selectividad del catalizador a base el copolímero (8%).

Catalizador	HC/CAT, g/g	Tiem., h	Temp., °C	X AlCl ₃	Conv., %	Selectividad				
						C ₅₊	C ₈	C ₉₊	TMP	DMH
H ₂ SO ₄	4	0.5	8	--	71	7	4	71	12	6
AlCl ₃	7.6	1	-3	100	91.4	31	2	55	8	4
[VPSO ₃ H][Cl]-BVIM[Br]-(30-70)	7.6	1	-6	0.75	90	19	0	51	26	4
[VPSO ₃ H][Cl]-BVIM[Br]-(30-70) Segundo uso	7.6	1	-6	0.75	62	17	1	57	20	5

*NOTA: El % de selectividad de C₈ es la fracción de moléculas lineales con 8 átomos de carbono.

Tabla 3. Conversiones y selectividad obtenidas en la reacción de alquilación I/O con el catalizador [VP-SO₃H][Cl]-BVIM[Br] (30-70) X_{AlCl₃}= 0.75.

Las gasolinas que se obtuvieron bajo estas pruebas se recolectaron por decantación. Estos nuevos materiales catalíticos se reutilizaron (sin reactivación) en dos reacciones de alquilación consecutivas, disminuyendo la conversión 62%. La desactivación del catalizador ocurre por una adsorción de productos de la reacción de alquilación y una disminución del contenido de sal metálica.

En la **Figura 3** se muestran 2 micrografías del catalizador [PVP-SO₃H][Cl]-BVIM [Br] (30-70) X_{AlCl₃}= 0.75 antes y después de su uso en la reacción. La micrografía que corresponde al reuso del catalizador se tomó únicamente separando los productos de reacción sin ningún tratamiento. Se puede apreciar cómo las partículas se aglomeran después de que

se usó en la reacción y el cambio de contraste se debe a la presencia de aceite (compuestos C₉₊), ya que, la finalidad de realizar el experimento en el catalizador húmedo fue identificar que los hidrocarburos pesados se adsorben en el catalizador y por lo tanto la necesidad de realizar un tratamiento de recuperación de la matriz polimérica. La **Tabla 4** muestra una comparación elemental tomada por EDX en donde el contenido de carbono aumenta debido a la presencia de hidrocarburos en la matriz del catalizador, igualmente aumentó la presencia de nitrógeno debido a que este gas se utilizó para alcanzar la presión de reacción. El aluminio y los otros elementos del catalizador disminuyen notablemente en la superficie.

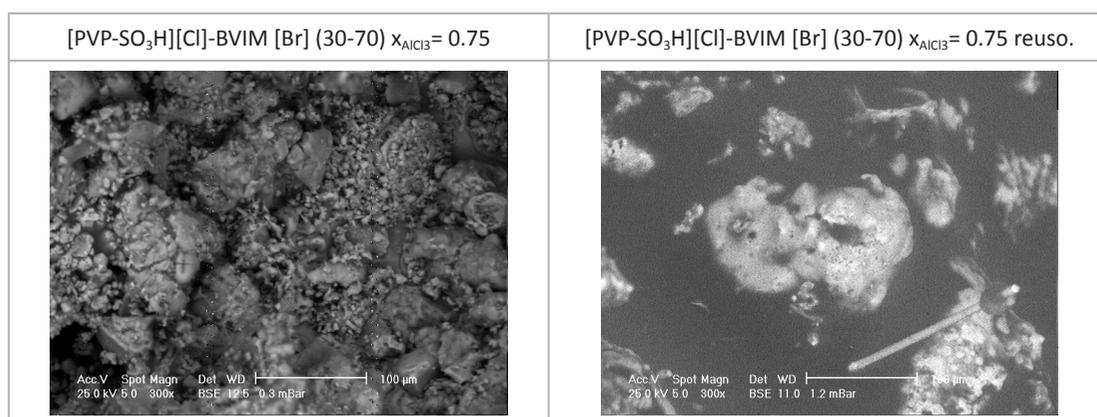


Figura 3. Micrografías del catalizador [PVP-SO₃H][Cl]-BVIM [Br] (30-70) X_{AlCl₃}= 0.75 antes y después de su uso en la reacción de alquilación.

Elemento	[PVP-SO ₃ H][Cl]-BVIM [Br] (30-70) $x_{\text{AlCl}_3} = 0.75$	
	nuevo	reciclado
C	22.3	66.9
N	11.7	24.1
O	31.5	7.5
Al	2	0
S	0.9	0.3
Cl	29.3	1.1
Br	2.2	0.2

Tabla 4. Comparación elemental del catalizador [PVP-SO₃H][Cl]-BVIM [Br] (30-70) $x_{\text{AlCl}_3} = 0.75$ antes de la reacción y después del segundo reciclado.

Conclusiones

Se logró sintetizar el copolímero a partir de los monómeros VP y BVIM[Br], el cual mediante la incorporación de grupos sulfónicos y de sitios de Lewis se usó como catalizador en la reacción de alquilación entre el isobutano y 2-buteno (I/O). El catalizador polimérico [VPSO₃H][Cl]-BVIM[Br]–(30-70) y $X_{\text{AlCl}_3} = 0.75$ se empleó con gases provenientes de una corriente de gases de refinería con la relación I/O 9:1 y condiciones suaves de reacción (-6 °C y 260 psi). Se alcanzó una selectividad a TMP (26%), la cual fue superior con a las reacciones catalizadas por H₂SO₄ (12 %) y AlCl₃ (8%). El catalizador a base del copolímero se utilizó en dos reacciones consecutivas, en las que disminuyó la conversión a 62% y selectividad a 20%. La cantidad de catalizador polimérico en la reacción es menor en comparación con la reacción que se cataliza con H₂SO₄, por lo que lo convierte en un material económicamente competitivo.

Nomenclaturas

VP=	vinilpirrolidona
BVIM[Br]=	1-vinil-3-butylimidazolío
TMP=	Trimetilpentanos
DMH=	Dimetilhexanos
F ₀ =	fracción final de monómeros incorporada a la cadena polimérica.
f ₀ =	fracción inicial de monómeros en la mezcla de reacción.
MON:	Motor Octane Number
RON:	Research Octane Number

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Mexicano del Petróleo (números Y.62011) y CONACYT CF19-191973 por el apoyo a esta investigación.

Referencias

- Abdellatief, T. M. M., Ershov, M. A., Savelenko, V. D. et al. 2023. Advanced Progress and Prospects for Producing High-Octane Gasoline Fuel toward Market Development: State-of-the-Art and Outlook. *Energy & Fuels* **37** (23): 18266–18290. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02541>.
- Bazaldúa-Domínguez, M., Vega-Paz, A., Likhanova, N. V. et al. 2023. In-Situ 1H NMR Measurements of Reactivity Ratios and Thermal Properties for Copolymerization of N-Vinylpyrrolidone and 1-Vinyl-3-Butylimidazolium Bromide. *Materials Today Communications* **35**: 105709. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105709>.
- Bui, T. L. T., Korth, W., Aschauer, S. et al. 2009. Alkylation of Isobutane with 2-Butene Using Ionic Liquids as Catalyst. *Green Chemistry* **11** (12): 1961–67. <https://doi.org/10.1039/B913872B>.
- Bui, T. L. T., Korth, W. y Jess, A. 2012. Influence of Acidity of Modified Chloroaluminate Based Ionic Liquid Catalysts on Alkylation of Iso-Butene with Butene-2. *Catalysis Communications* **25**: 118–24. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2012.03.018>.

- Gao, X., Fang, Y., Wang, Z. et al. 2020. Mild and Highly Selective Preparation of Alkylate Gasoline Promoted by Using Polyetheramine-Based Acidic Ionic Liquid. *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology* **22** (2): 64–70.
- Guzmán-Lucero, D., Castillo-Acosta, S. y Martínez-Palou, R. 2020. Glycerol Carbonate Synthesis Using Poly(1-Alkyl-3-Vinylimidazolium) Imidazolates as Catalysts. *ChemistrySelect* **5** (43): 13694–702. <https://doi.org/10.1002/slct.202003620>.
- Guzmán-Lucero, D., Guzmán-Pantoja, J., Díaz Velázquez, H. et al. 2021. Isobutane/Butene Alkylation Reaction Using Ionic Liquids as Catalysts. Toward a Sustainable Industry. *Molecular Catalysis* **515**: 111892. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111892>.
- Guzmán-Lucero, D., Likhanova, N., López Falcon, D. et al. 2017. Procedimiento de Obtención y Caracterización de Copolímeros y Terpolímeros Iónicos Altamente Solubles en Agua. Derechos de autor: 03-2017-083111353600-01.
- Hemalatha, P., Veeraiah, M. K. S., Kumar, P. et al. 2014. Reactivity Ratios of N- Vinylpyrrolidone - Acrylic Acid Copolymer. *American Journal of Polymer Science* **4** (1): 16- 23.
- Hsu, C. S. y Robinson, P. R. 2017. Gasoline Production and Blending. En *Springer Handbook of Petroleum Technology*, eds. C. S. Hsu y P. R. Robinson, 551-587. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49347-3_17.
- Liu, Y., Gao, H., Sheng, X. et al. 2019. The Catalytic Performance Study of Polymerized Ionic Liquid Synthesized in Different Conditions on Alkylation of O-Xylene with Styrene. *Applied Organometallic Chemistry* **33** (11): e5186. <https://doi.org/10.1002/aoc.5186>.
- Rebolledo-Libreros, M. E., Reza, J., Trejo, A. et al. 2017. Evaluation of Copolymers from 1-Vinyl-3-Alkylimidazolium Bromide and N-Vinylcaprolactam as Inhibitors of Clathrate Hydrate Formation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **40** (abril): 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.008>.
- Shirini, F., Goli-Jolodar, O., Akbari, M. et al. 2016. Preparation, Characterization, and Use of Poly(Vinylpyrrolidonium) Hydrogen Phosphate ([PVP-H] H₂PO₄) as a New Heterogeneous Catalyst for Efficient Synthesis of 2-Amino-Tetrahydro-4H-Pyrans. *Research on Chemical Intermediates* **42** (5): 4733–4749. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2312-y>.
- Trujano Pérez, R. A. 2018. *Síntesis y Caracterización de Terpolímeros Iónicos Basados en Acrilamida, N-Vinilpirrolidona y Líquidos Iónicos Vinílicos con Potencial Aplicación en Ambientes Acuoso con Alta Salinidad y Alta Temperatura*. Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (julio).
- Yosefzadeh, M. y Mokhtary, M. 2016. Polyvinylpyrrolidone Supported Chlorosulfonic Acid: An Efficient Catalyst for the One-Pot Synthesis of Hexahydroquinolines. *Iranian Journal of Catalysis* **6** (2): 153-159.
- Yu, F. L., Li, G. X., Gu, Y. L. et al. 2018. Preparation of Alkylate Gasoline in Polyether- Based Acidic Ionic Liquids. *Catalysis Today* **310**: 141–45. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.05.085>.

Semblanzas de los autores

Mercedes Bazaldúa Domínguez

Ingeniera química por el Instituto Tecnológico de Chihuahua (ambiental) (2013), Maestra en Ciencias por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados con especialidad en desarrollo de inhibidores de corrosión (2016) y actualmente estudia el doctorado en Transformación Industrial de Hidrocarburos en el Instituto Mexicano del Petróleo.

Es autora y coautora de diversas obras que incluyen tres artículos científicos en revistas indexadas, derechos de autor, patentes nacionales y 10 congresos nacionales e internacionales. Tiene más de siete años de experiencia en el desarrollo y aplicación de materiales para áreas de la industria metalúrgica.

Araceli Vega Paz

Licenciatura en Químico-farmacobiología, Doctorado en Ciencias Químicas (Inorgánica) por la Universidad Autónoma Metropolitana, miembro al Sistema Nacional de Investigadores (nivel I), estancia posdoctoral en el CIQ-UAEM (Morelos), 2ª estancia posdoctoral en el IMP-SEDE, actualmente investigador del IMP-SEDE.

Diego Guzmán Lucero

Ingeniero Químico, Maestro en Ciencias Nucleares y Doctor en Ciencias Químicas (polímeros) por la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM). Realizó tres años de estancia posdoctoral en el Instituto Mexicano del Petróleo, (IMP) y en 2006 se incorporó al IMP. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde el 2005.

José Gonzalo Hernández Cortez

Químico Industrial, con Maestría y Doctorado en Química y Ciencias respectivamente, por la Universidad Autónoma Metropolitana con especialidad en catálisis y petroquímica.

En 2003 ingresó al IMP, en donde ha participado en diferentes proyectos de investigación. Actualmente tiene el nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadores y más de 1500 citas.

Rafael Martínez Palou

Licenciado en Química por la Universidad de La Habana. Estudió maestría y doctorado en Ciencias Quimicobiológicas con especialidad en Química Bioorgánica en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), donde posteriormente fue contratado como Investigador Científico.

Es autor y coautor de 22 solicitudes de patente nacionales y 20 internacionales, de las cuales 23 han sido concedidas, 9 Derecho de Autor, y ha publicado más de 60 artículos en revistas nacionales e internacionales, es autor de 2 libros y 7 capítulos en libros.