

# Evaluación de la Temperatura de Calentamiento en la Tecnología de Reciclaje de Polietileno Mediante Degradación



## Colaboración

Irma Pérez Hernández; José Echegaray Franyutti; Rosa M. Vaca Espino; Angelica Pérez Hernández, Universidad Veracruzana; José Nolasco Cruz, Universidad de Guanajuato

Fecha de recepción: 03 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2026

Autor de Correspondencia: José Nolasco Cruz

**RESUMEN:** El presente trabajo se presenta un caso de estudio experimental sobre la degradación termoquímica del polietileno de alta densidad (HDPE), evaluando la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento. El estudio fue realizado en un reactor tipo semi-batch de acero a 3 diferentes temperaturas (380, 420, 460 °C) y 3 diferentes velocidades de calentamiento (15, 17, 23 °C.min<sup>-1</sup>). Para el estudio se utilizaron 250g de HDPE en forma de pellets. Los resultados muestran que a una temperatura de 460 °C se logran obtener tasas de conversión superiores al 95 % en peso, y a temperaturas por debajo de los 400 °C la tasa de conversión termoquímica tiende a disminuir considerablemente, aumentando los compuestos recalcitrantes.

**PALABRAS CLEVE:** Líquido combustible, HDPE, Degradación, Reciclaje alternativo.

**ABSTRACT:** This study presents an experimental case study on the thermochemical degradation of high-density polyethylene (HDPE), evaluating the influence of temperature and heating rate on the process performance. The experiments were conducted in a stainless-steel semi-batch reactor at three different temperatures (380, 420, and 460 °C) and three heating rates (15, 17, and 23 °C.min<sup>-1</sup>). A total of 250 g of pelletized HDPE was used in each experimental run. The results demonstrated that, at 460 °C, conversion yields above 95 wt. % were achieved. In contrast, at temperatures below 400 °C, the thermochemical conversion rate decreased significantly, promoting the formation of recalcitrant compounds.

**Keywords:** liquid fuel, HDPE, thermochemical degradation, alternative recycling.

## INTRODUCCIÓN

Desde mediados del año 1900, la demanda de plástico ha crecido año tras año, hasta ser casi irremplazables para el ser humano en la sociedad moderna. La producción mundial de plástico para el año 2017 fue cercana a 350 millones de toneladas, y se espera que siga creciendo cada año (Park et al., 2020). Debido a ello, ha incrementado la acumulación de residuos plásticos, generando a su vez problemas por alta disposición de residuos en los vertederos. De acuerdo con algunas estadísticas tan solo en Europa cerca del 39 % de

todo el plástico consumido termina en vertedero (Al-Salem et al., 2017).

Generalmente los plásticos se dividen en dos grandes familias, termoplásticos y termoestables. Dentro del grupo de termoplásticos se pueden encontrar el polietileno de baja densidad (por sus siglas en inglés, LDPE), polietileno de alta densidad (por sus siglas en inglés, HDPE), poliestireno (por sus siglas en inglés, PS), policloruro de vinil (por sus siglas en inglés, PVC), polietileno tereftalato (PET), policarbonato (por sus siglas en inglés, PC) y Poli-metacrilato de metilo (por sus siglas en inglés, PMM). Los termoestables son el poliuretano, poliéster, éster de vinilo, silicón y resina de melamina (Aisien et al., 2021; Kyaw et al., 2015).

De acuerdo con la Asociación Europea de Plásticos (Plastics Europe) el HDPE ocupa el tercer lugar como plástico de mayor consumo, representado por un 12,2 % (Plastics Europe, 2019). El HDPE generalmente se puede encontrar en productos como juguetes, botellas de leche, botes de champú, tuberías, menaje, etc. Generalmente a los plásticos contienen aditivos como retardantes de flama, estabilizadores, y oxidantes con el fin de mejorar sus propiedades físicas, esto genera que su degradación natural sea casi nula durante varios cientos de años (Barrick et al., 2021). Esto ha ocasionado, que su acumulación en vertederos, ambientes marinos y terrestres incrementa año con año generando problemáticas como contaminación de agua, reducción de espacio en los vertederos, obstrucción de alcantarillado, entre otros (Jiang et al., 2020).

Todas estas problemáticas pueden ser eliminadas a través de un manejo eficiente de los residuos plásticos, como es el reciclado o recuperación energética. Sin embargo, algunas técnicas de reciclaje tienen algunas desventajas como es un proceso de triturado y lavado del residuo y contaminación de agua. También, existen otras técnicas que evitan estas desventajas, pero resultan ser más complejas, como la degradación térmica (Aisien et al., 2021; Thahir et al., 2019; Wang et al., 2022). Sin embargo, esta última es uno de los métodos considerados como amigables con el medio ambiente.

Por lo tanto, la degradación térmica es un proceso sustentable en el manejo de residuos. El líquido obtenido se considera como una fuente energética, obteniendo también carbón sólido y gases de alto valor agregado (Fivga & Dimitriou, 2018). El proceso resulta en una significativa reducción en el volumen de los residuos, bajas temperaturas para su degradación, bajo costo de capital, y lo más importante, la recuperación energética a través de la generación de distintos productos (Vijayakumar & Sebastian, 2018).

Algunos autores como Abdulkareem y Eleburuiké (2008), estudiaron la degradación térmica del HDPE en

un reactor de acero inoxidable, a una temperatura de 430-520 °C.min<sup>-1</sup> durante 2 ½ horas. Los resultados mostraron un rendimiento líquido de 50,64 wt %, gaseoso de 15,74 wt % y sólido de 33,62 wt %. Además, de acuerdo con el análisis cromatográfica, el producto gaseoso mostro una composición química de C1- C5, y el producto líquido una composición de C8-C25.

Al-Salem y P. Lettieri (Al-Salem & Lettieri, 2010) estudiaron la degradación térmica del HDPE, los experimentos se realizaron mediante termogravimetría en un reactor montado en una micro balanza a una temperatura de 500-600 °C. Los resultados mostraron que a una temperatura de 500 °C se obtuvo un rendimiento líquido de 13,2 wt %, gases 20,2 wt %, ceras 65,8 wt %. A 550 °C un rendimiento líquido de 8 wt %, gas 32,8 wt %, ceras 58,2 wt %. A 600 °C el rendimiento líquido fue de 11 wt %, gas 43,7 wt % y mezcla 44,1 wt %.

Istoto et al., (Istoto et al., 2019) realizaron la degradación térmica de HDPE. Los ensayos fueron realizados con 5 kg de residuo previamente lavado y secado con un calentamiento de 4 horas a una temperatura entre 450 °C- 621 °C en un reactor de tipo batch. Los resultados mostraron una tasa de conversión de 99,5 wt %, en diversas fracciones, nafta 65 %, diesel 6 %, gasolina 17 %, gas 11,5 % y residuos 0,5 % aproximadamente.

De acuerdo con los estudios reportados, los factores más importantes en la degradación térmica son la temperatura y velocidad de calentamiento. Es por ello por lo que surge este trabajo, con el fin de evaluar estos dos parámetros y su efecto sobre los rendimientos líquidos, gaseosos y sólidos, con el objetivo de establecer la degradación térmica como un método alternativo al reciclaje tradicional.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Materiales

Los materiales utilizados para llevar a cabo este trabajo fueron: polietileno de alta densidad en forma de pellets (HDPE) y reactor de acero inoxidable semi-batch de 300 g de capacidad (Figura1).

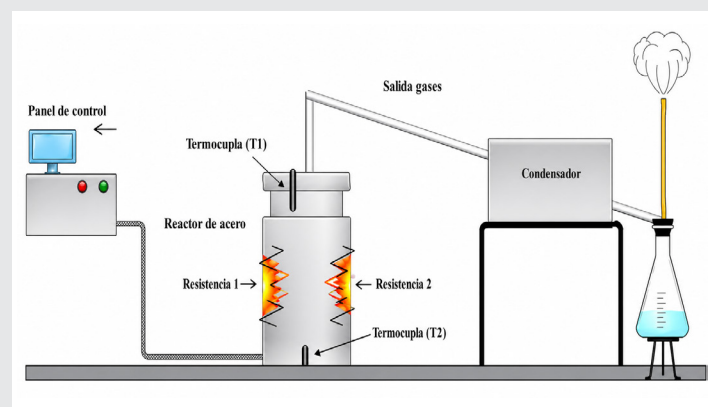


Figura 1.- Esquema experimental.

Fuente: Elaboración propia.

## Metodología experimental y análisis de eficiencias:

Con base a la literatura se establecieron diferentes temperaturas con la finalidad de observar el comportamiento de los residuos plásticos. El procedimiento fue realizado a tres diferentes temperaturas (380, 420, 460 °C) y tres velocidades de calentamiento (15, 17, 23 °C/min) de calentamiento. Se utilizaron 250 g de HDPE en forma de pellets, y fueron ingresados en un reactor semi Batch de acero (Figura 1), a presión atmosférica. El reactor fue calentado mediante un par de resistencias eléctricas. La temperatura se monitoreó mediante dos termocuplas, una ubicada en la tapa del reactor (T1, Figura 1) y otra en la parte inferior del reactor (T2, Figura 1). Los experimentos se condujeron hasta alcanzar la temperatura de insignia, y se detuvieron hasta que la conversión termoquímica se detuvo.

La fase líquida/cerosa fue recolectada y separada, la fase gaseosa se liberó a la atmósfera de manera directa y el producto sólido se recuperó del reactor al finalizar cada prueba.

La degradación termoquímica consto de tres diferentes tipos de hidrocarburos, productos líquidos y gaseosos en mayor cantidad, y como residuos del proceso una fracción de carbón, su masa fue calculada de acuerdo con las diferencias de masas utilizando la ecuación 1 dada por (Miskolczi et al., 2009).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^3 m_i} \cdot 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $m_i$  es la masa de los productos (1 = hidrocarburos gaseosos, 2 = hidrocarburos líquidos, 3 = carbón), el porcentaje de gas se determinó bajo diferencias de masas del producto líquido y el carbón (ecuación 2).

$$\text{Rendimiento (\%)} = 100 - m_l - m_{char} \quad \text{Ec. (2)}$$

## RESULTADOS

Durante el proceso de descomposición térmica, se observa una continua regeneración de radicales y otros compuestos intermedios, lo que se conoce como el mecanismo de propagación. Estas reacciones en las cadenas moleculares finalmente culminan en la reagrupación de los radicales libres, los cuales logran su estabilización, marcando así la etapa final denominada mecanismo de terminación. En esta fase, todos estos radicales se estabilizan y dan origen a la formación de nuevos compuestos. (Shah et al., 2010) (Siddiqui & Redhwi, 2009).

Los mecanismos involucrados en el proceso de degradación son sensibles a la temperatura y a la rapidez del aumento de calor. Estos dos factores alteran las diversas etapas del proceso, lo que resulta en disparidades en los rendimientos de los productos resultantes (líquidos, ceras, gases, sólidos). La influencia de la temperatura y la velocidad de

calentamiento en los rendimientos de degradación térmica del HDPE se ilustra en la Figura 2.

Se ha observado que, en la mayoría de los casos, el índice de conversión termoquímica tiende a aumentar a temperaturas más elevadas. Este aumento se atribuye a la energía de activación necesaria para que el mecanismo de ruptura pueda afectar las cadenas de carbono-carbono (C-C). La mayor tasa de conversión se logró a una temperatura de 460 °C y una velocidad de calentamiento de 23 °C/min, obteniendo una tasa de conversión de casi un 98 % en peso (líquido/cera [36.8 % en peso], gases [61.2 % en peso]).

De acuerdo con Çit et al., (Çit et al., 2010), la degradación termoquímica de estos polímeros resulta principalmente en la formación de productos alifáticos, siendo los alcanos, alquenos y alquinos los más prominentes en términos de concentración.

Los resultados presentados indican una relación directa entre temperaturas más elevadas y tasas de conversión mejoradas, lo que conduce a la producción de productos líquidos/ceras y gases no condensables. Por otro lado, se observa que, a temperaturas más bajas, específicamente por debajo de 400 °C, las tasas de conversión son notablemente menos eficientes.

Con relación a las velocidades de calentamiento, desempeñan un papel crucial en las diversas etapas de los mecanismos de reacción, ya que pueden acelerar o retardar dichos procesos. Esta influencia se evidenció especialmente a una temperatura de 420 °C. Allí, una disminución en la velocidad de calentamiento resultó en un incremento en el rendimiento de líquidos/ceras. Por otro lado, a temperaturas inferiores a 400 °C, se observó una disminución en la tasa de conversión, lo que llevó a un aumento en la formación de compuestos sólidos o recalcitrantes.

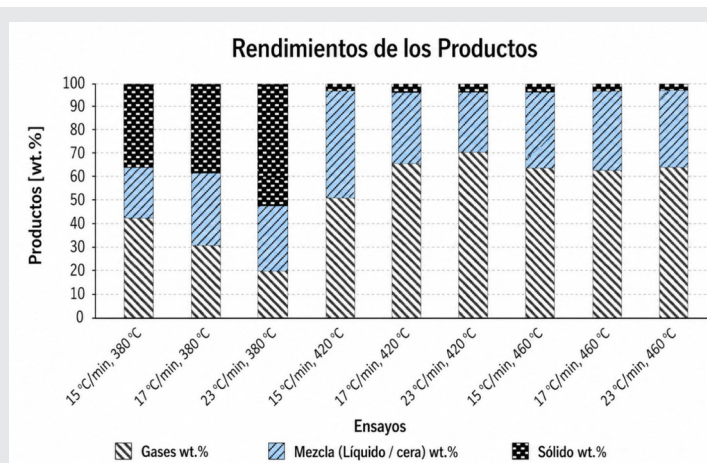
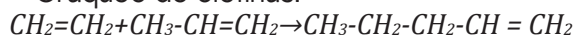


Figura 2. Rendimientos de los productos obtenidos de la degradación termoquímica del HDPE.

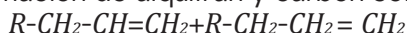
Fuente: Elaboración propia.

La preponderancia de compuestos recalcitrantes se atribuye principalmente a la descomposición de productos primarios como las olefinas. Este proceso provoca la despolimerización y conlleva a la formación de hidrocarburos de alto peso molecular, que posteriormente generan la producción de alquitrán y carbón sólido. Este fenómeno se ilustra en las reacciones a continuación:

Craqueo de olefinas:



Formación de alquitrán y carbón sólido



En este proceso, las olefinas experimentan una serie de reacciones de craqueo que dan como resultado la generación de compuestos de mayor complejidad molecular, los cuales finalmente contribuyen a la formación de alquitrán y carbón sólido.

El mecanismo reversible de radicales libres desempeña un papel fundamental en la génesis de productos como el alquitrán y el carbón sólido (Ballice & Reimert, 2002). Estas reacciones brindan oportunidades en ambas direcciones: en primer lugar, permiten la ruptura de enlaces C-C, lo que da lugar a la formación de compuestos de menor peso molecular; no obstante, también favorecen la generación de moléculas de mayor tamaño. A temperaturas más bajas, la movilidad de los radicales generados es limitada, lo que se refleja en los rendimientos significativos de productos sólidos obtenidos a una temperatura de 380 °C, alcanzando hasta un 54,6 % en peso. La mayor formación de alquitrán a temperaturas más bajas podría atribuirse a una escasa incisión o ruptura de los enlaces C-C. De acuerdo con Ishaq et al. (Ishaq et al., 2006), se necesita una energía superior a >68 kJ mol<sup>-1</sup> para lograr una ruptura efectiva de las cadenas C-C y, por ende, una mayor eficiencia en este proceso.

## CONCLUSIONES

La tasa de degradación del HDPE depende significativamente de la temperatura y la velocidad de calentamiento. Cada uno de los mecanismos involucrados se ven directamente influenciado por estas variables. A temperaturas inferiores de 400 °C y con velocidades superiores a 23 °C. min<sup>-1</sup>, se registra una alta tasa de conversión en compuestos recalcitrantes y limitada ruptura de las cadenas carbonadas C-C, inhibiendo la movilidad de los radicales para la formación de nuevos compuestos. En contraste a temperaturas superiores a los 400 °C, especialmente cercanas a los 460 °C, la tasa de conversión aumenta considerablemente llegando a tasas de conversión termoquímica superiores al 95 % en peso.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] K.-B. Park, Y.-S. Jeong, B. Guzelciftci, and J. S. Kim, "Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyroly-

sis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes," *Applied Energy*, vol. 259, p. 114240, 2020.

[2] S. M. Al-Salem, A. Antelava, A. Constantinou, G. Manos, and A. Dutta, "A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)," *Journal of Environmental Management*, vol. 197, no. 1408, pp. 177-198, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.084.

[3] E. T. Aisien, I. C. Otuya, and F. A. Aisien, "Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 22, p. 101455, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101455.

[4] K. T. Kyaw, C. Su, and S. Hmwe, "Effect of Various Catalysts on Fuel Oil Pyrolysis Process of Mixed Plastic Wastes," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 794-802, 2015.

[5] *Plastics Europe*, "Plásticos - Situación en 2019," Madrid-España, 2019.

[6] C. Ma et al., "Catalytic pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene over various solid acid catalysts," *Fuel Processing Technology*, vol. 155, pp. 32-41, 2017, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.01.018.

[7] I. Kyrikou and D. Briassoulis, "Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 15, no. 2, pp. 125-150, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0053-8.

[8] R. Thahir, A. Altway, S. R. Juliastuti, and Susianto, "Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 70-77, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2018.11.004.

[9] S. Wang et al., "Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5 kW heater," *Energy*, vol. 247, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123408.

[10] A. Fivga and I. Dimitriou, "Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment," *Energy*, vol. 149, pp. 865-874, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.094.

[11] N. Patni, P. Shah, S. Agarwal, and P. Singhal, "Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels," vol. 2013, 2013.

[12] A. S.A. and E. N. A., "PYROLYSIS OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) WASTE PRODUCTS INTO USEFUL FUELS," vol. 32, 2008.

[13] S. D. A. S. Ammar S. Abbas, "Pyrolysis of High-density Polyethylene for the Production of Fuel-like Liquid Hydrocarbon," vol. 9, no. 1, pp. 23-29, 2008.

[14] S. M. Al-Salem and P. Lettieri, "Kinetic study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 88, no. 12, pp. 1599-1606, 2010, doi: 10.1016/j.cherd.2010.03.012.

[15] N. Miskolczi, A. Angyal, L. Bartha, and I. Valkai, "Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 7-8, pp. 1032-1040, 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.04.019.

[16] J. Shah, M. R. Jan, F. Mabood, and F. Ja-been, "Catalytic pyrolysis of LDPE leads to valuable resource recovery and reduction of waste problems," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, pp. 2791-2801, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.016.

[17] M. N. Siddiqui and H. H. Redhwi, "Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 4, pp. 545-552, 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.01.003.

[18] I. Çit, A. Sinağ, T. Yumak, S. Uçar, Z. Mırsirlioğlu, and M. Canel, "Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET," *Polymer Bulletin*, vol. 64, no. 8, pp. 817-834, 2010, doi: 10.1007/s00289-009-0225-x.

[19] L. Ballice and R. Reimert, "Temperature-programmed co-pyrolysis of Turkish lignite with polypropylene," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 65, no. 2, pp. 207-219, 2002, doi: 10.1016/S0165-2370(01)00195-4.

[20] M. Ishaq, I. Ahmad, M. Shakirullah, M. A. Khan, Habib ur Rehman, and A. Bahader, "Pyrolysis of some whole plastics and plastics-coal mixtures," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 18-19, pp. 3216-3223, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2006.02.019.

