

REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 2, Número 1
Enero- Marzo 2025

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

VOLUMEN 2, NÚMERO 1, 2025

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 2, Número 1
enero- marzo 2025

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

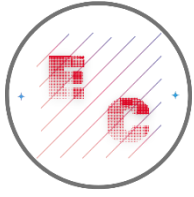
Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 2, Núm. 1, enero-marzo 2025, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 enero 2025.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 2, Número 1, 2025, enero-marzo

DOI: <https://doi.org/10.71112/8p1egg26>

**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS A PARTIR DE RESIDUOS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) MEDIANTE SIMULACIÓN EN ASPEN
PLUS®**

**OBTAINING SYNTHETIC FUELS FROM HIGH-DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)
WASTE THROUGH SIMULATION IN ASPEN PLUS®**

Grover Mercado Condori

Grisel Santamaria Vasquez

Bolivia

DOI: <https://doi.org/10.71112/8p1egg26>

Obtención de combustibles sintéticos a partir de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) Mediante Simulación en Aspen Plus ®

Obtaining synthetic fuels from high-density polyethylene (HDPE) waste Through Simulation in Aspen Plus ®

Grover Mercado Condori

grovermercadocondori@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-7032-3853>

Universidad Pública de El Alto (UPEA)

Bolivia

Grisel Santamaria Vasquez

griselsantamariavasquez@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-4156-0676>

Universidad Pública de El Alto (UPEA)

Bolivia

RESUMEN

El reciclaje de plásticos, especialmente el polietileno de alta densidad (HDPE), ha ganado relevancia debido a su impacto ambiental. La pirólisis, un proceso de descomposición térmica, emerge como una solución viable para convertir estos residuos en combustibles sintéticos, reduciendo así la acumulación de plásticos. El objetivo de este estudio es simular, mediante Aspen Plus®, el proceso de pirólisis de HDPE para obtener combustibles sintéticos. Se utilizó el software Aspen Plus® para modelar y simular las condiciones óptimas de pirólisis, analizando parámetros como temperatura y tiempo de residencia. Los resultados muestran que, bajo condiciones específicas, el proceso puede generar productos con propiedades similares a los combustibles convencionales. Las conclusiones destacan el potencial de la

pirólisis como una alternativa para la valorización de residuos plásticos y su aplicabilidad en la producción de combustibles renovables, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: reciclaje, polietileno, pirólisis, combustibles sintéticos, Aspen Plus®.

ABSTRACT

The recycling of plastics, especially high-density polyethylene (HDPE), has gained relevance due to its environmental impact. Pyrolysis, a thermal decomposition process, is emerging as a viable solution to convert this waste into synthetic fuels, thereby reducing the accumulation of plastics. The objective of this study is to simulate, using Aspen Plus®, the pyrolysis process of HDPE to obtain synthetic fuels. Aspen Plus® software was used to model and simulate optimal pyrolysis conditions, analyzing parameters such as temperature and residence time. The results show that, under specific conditions, the process can generate products with properties similar to conventional fuels. The conclusions highlight the potential of pyrolysis as an alternative for the recovery of plastic waste and its applicability in the production of renewable fuels, contributing to environmental sustainability.

Keywords: recycling, polyethylene, pyrolysis, synthetic fuels, Aspen Plus®.

Recibido: 15 de enero 2025 | Aceptado: 12 de febrero 2025

INTRODUCCIÓN

El uso de plásticos ha adquirido una gran relevancia en el desarrollo de un estilo de vida moderno, debido a su versatilidad y su amplia aplicación en diversos sectores (Conesa, J. A., Marcilla, A., Font, R., & Caballero, J. A., 1996). Sin embargo, la creciente generación de residuos plásticos, particularmente el polietileno de alta densidad (HDPE), ha suscitado una gran preocupación por su impacto ambiental. Estos residuos se acumulan en vertederos y tienen una baja tasa de reciclaje. A pesar de sus propiedades útiles, como la alta durabilidad y versatilidad, no se aprovechan completamente en el contexto de la economía circular. Esto ha llevado a un creciente interés en la valorización de residuos plásticos, destacándose procesos como la pirólisis, que transforman estos materiales en combustibles sintéticos. Este trabajo se enfoca en la simulación de la obtención de combustibles a partir de HDPE mediante el software Aspen Plus®, con el objetivo de optimizar las condiciones operativas del proceso y promover soluciones más sostenibles.

Según Plastics Europe y Conversio Market & Strategy GmbH (2019), la producción global de plásticos ha mostrado un crecimiento constante en las últimas décadas, alcanzando cifras significativas que reflejan su amplio uso en múltiples industrias. Sin embargo, este aumento también ha generado un desafío ambiental relacionado con la acumulación de residuos y la baja tasa de reciclaje, especialmente en polímeros como el polietileno de alta densidad (HDPE)

La pirólisis, un proceso térmico, se define como la ruptura o descomposición de materiales por el efecto del calor o fuego. La etimología de la palabra pirólisis proviene de "piro" (fuego o calor) y "lisis" (ruptura o descomposición), lo que explica su función básica en la degradación térmica, como la de una biomasa, en una atmósfera inerte libre de agentes oxidantes (Gao, F., 2010; La República, 2022). Este proceso se ha consolidado como una opción eficaz para la conversión de residuos plásticos en productos valiosos.

En términos de reciclado, existen varios enfoques que incluyen procesos físicos y químicos. Los métodos físicos, comúnmente denominados las "tres R" (reducción, reutilización y reciclaje), son menos eficientes, ya que los residuos plásticos suelen regresar al medio ambiente y, eventualmente, se dispersan como microplásticos. Además, estos métodos requieren altos costos laborales debido a la necesidad de separar los materiales, lo que afecta la sostenibilidad del proceso (Moinuddin et al., 2012). En cambio, el proceso químico a través de la pirólisis ofrece una alternativa más eficiente y económica, ya que permite recuperar la energía contenida en los plásticos y transforma los residuos en combustibles valiosos (Anuar et al., 2016; Zadgaonkar, 2006).

Diversos estudios han abordado la problemática de los residuos plásticos y su conversión en productos útiles. En este contexto, Amar Gil, Sebastián, Ardila Arias, Alba N., y Barrera Zapata, Rolando (2019) destacan la pirólisis como una solución viable para mitigar el impacto ambiental de los plásticos, ya que permite recuperar energía y generar productos como combustibles líquidos y gaseosos. En su investigación, implementaron dos modelos en Aspen Plus para simular el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos, observando que los modelos cinéticos resultaron ser más precisos que los termodinámicos para predecir los rendimientos y las propiedades de los productos obtenidos. Además, concluyeron que el HDPE favorece la formación de combustibles líquidos, lo que resalta su potencial como fuente de energía.

Por otro lado, Ordoñez-Agreto et al. (2023) realizaron una revisión bibliométrica centrada en la pirólisis de PET y PS, buscando optimizar el proceso para favorecer la producción de productos gaseosos. Estos gases, a su vez, pueden utilizarse como precursores para el crecimiento de nanoestructuras de carbono, ampliando así las aplicaciones industriales de los residuos plásticos. En este sentido, sugieren que la reducción de temperaturas y tiempos de reacción mejora tanto la eficiencia del proceso como la calidad de los productos generados.

En línea con este enfoque, la investigación de Rejas et al. (2015) demostró que la pirólisis de residuos plásticos, como el HDPE, puede generar hidrocarburos líquidos con propiedades similares a los combustibles convencionales. Según su estudio, los productos obtenidos pueden refinarse para producir diésel, gasolina y queroseno, ofreciendo una alternativa energética sostenible. Además, este proceso contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables, lo que refuerza la importancia de la pirólisis como una solución sostenible y rentable para la valorización de residuos plásticos.

La acumulación de residuos plásticos ha generado una crisis ambiental significativa en las últimas décadas, especialmente debido a polímeros de alta durabilidad como el polietileno de alta densidad (HDPE). Este material, ampliamente utilizado en envases y productos industriales, presenta un bajo índice de biodegradabilidad, lo que dificulta su gestión eficiente (López et al., 2018). En respuesta a esta problemática, la valorización de residuos plásticos mediante procesos termoquímicos, como la pirólisis, ha surgido como una alternativa sostenible para la producción de combustibles sintéticos (García & Torres, 2020).

El proceso de pirólisis permite descomponer térmicamente los polímeros en ausencia de oxígeno, generando productos líquidos, gaseosos y sólidos con alto valor energético (Martínez et al., 2021). Investigaciones recientes han demostrado que la conversión de HDPE mediante este método puede producir hidrocarburos líquidos con características similares a los combustibles fósiles convencionales (Rodríguez & Sánchez, 2019). De acuerdo con Pérez et al. (2022), el rendimiento de los productos obtenidos está directamente influenciado por variables como la temperatura de reacción, la presencia de catalizadores y el tiempo de residencia.

Además, Miskolczi et al. (2009) investigaron la pirólisis de plásticos de desecho en un reactor tubular a 520 °C y 9 kg/h, utilizando un catalizador ZSM-5 al 5% para mejorar la ruptura de enlaces C-C. Se obtuvieron productos como gases, gasolina (C5–C15) y petróleo ligero (C12–C28), con rendimientos del 20-48% y 17-36% respectivamente, dependiendo de las

condiciones operativas. El catalizador incrementó la producción de fracciones ligeras y redujo el peso molecular medio, mejorando la calidad del combustible. Además, disminuyó impurezas (N, S, P, Ca) presentes en residuos agrícolas, optimizando la pureza de los productos finales.

Por otro lado, estudios recientes como el de Crespo (2019) abordan la importancia de controlar las condiciones operativas de la pirólisis, como la temperatura y el tiempo de residencia, para optimizar la producción de líquidos, gases y sólidos. Crespo señala que en la pirólisis convencional, a temperaturas más bajas, se prioriza la producción de sólidos, mientras que las altas temperaturas y tiempos de residencia más cortos favorecen la obtención de líquidos. Estos hallazgos son cruciales para mejorar los rendimientos del proceso de obtención de combustibles a partir de plásticos.

Diversas investigaciones han explorado la viabilidad de este proceso en términos de sostenibilidad y aplicación industrial. Según Gómez et al. (2016), la pirólisis de plásticos no solo reduce la cantidad de desechos acumulados en los vertederos, sino que también contribuye a la diversificación de fuentes energéticas renovables. Por su parte, Jiménez & Vargas (2020) resaltan que la integración de modelos cinéticos en Aspen Plus mejora la precisión de la predicción de rendimientos y la calidad de los combustibles obtenidos. Asimismo, estudios como el de Rojas & Medina (2018) han analizado el impacto ambiental del proceso, destacando la reducción de emisiones contaminantes en comparación con la incineración de residuos plásticos.

La simulación del proceso en Aspen Plus se ha convertido en una herramienta clave para la optimización y el análisis de las condiciones operativas. Estudios como el de Fernández et al. (2017) han evidenciado que la modelización computacional permite predecir con mayor precisión el comportamiento de los residuos plásticos durante su conversión en combustibles líquidos. Además, la simulación facilita la evaluación de diferentes escenarios para mejorar la

eficiencia energética y minimizar la generación de subproductos no deseados (Ramírez & Ortiz, 2023).

La valorización de residuos plásticos a través de la pirólisis y su simulación en Aspen Plus representa una estrategia prometedora para la producción de combustibles sintéticos. Investigaciones recientes han demostrado que la optimización de variables operativas es crucial para maximizar la eficiencia del proceso y mejorar la calidad de los productos obtenidos (Hernández et al., 2021). Por ello, este estudio se enfoca en la simulación del proceso de conversión de HDPE en combustibles líquidos mediante Aspen Plus, con el objetivo de identificar condiciones óptimas que favorezcan su implementación a escala industrial.

La simulación de estos procesos en Aspen Plus se ha convertido en una herramienta poderosa para predecir los resultados del proceso y optimizar las condiciones operativas. Según Salazar et al. (2024), la conversión de plásticos en combustibles líquidos a través de la pirólisis y la posterior condensación de los hidrocarburos generados es un área de gran interés, con aplicaciones tanto en la industria energética como en la gestión de residuos. Además, los modelos de Aspen Plus permiten estudiar las interacciones complejas dentro del proceso, como la transferencia de calor y la condensación de productos líquidos, lo que contribuye a una mayor comprensión de su funcionamiento.

En este contexto, el estudio de Proaño & Crespo (2009) proporciona datos clave sobre la relación entre las condiciones operativas y la composición de los productos obtenidos. De acuerdo con sus hallazgos, el tiempo de reacción en la pirólisis tiene un impacto significativo en la distribución de los productos, con tiempos más largos favoreciendo la formación de líquidos. En el caso específico de la pirólisis de HDPE, el estudio sugiere que la optimización de este parámetro es esencial para maximizar la producción de combustibles líquidos.

Por último, investigaciones como la de Zhang et al. (2018) implementan la co-pirólisis catalítica rápida asistida por microondas (co-MACFP) de granos secos de destilería con

solubles (DDGS) y películas de plástico agrícola de desecho (WAPMFs). Utilizando SiC como absorbente de microondas y ZSM-5/MCM-41 jerárquico como catalizador, se observan mejoras significativas en el rendimiento de carbono de los hidrocarburos en el bio-oil, lo que demuestra el potencial de este proceso para aumentar la eficiencia y reducir la formación de coque.

Por lo tanto, se han elaborado varias alternativas para llevar a cabo un proceso eficiente de reciclado de los desechos plásticos, y esos métodos incluyen procesos físicos y químicos. Los métodos físicos, conocidos como las "tres R" (reducción, reutilización y reciclado), son inapropiados, ya que los residuos plásticos finalmente terminan como desechos plásticos y requieren altos costos laborales para su separación, lo que reduce la sostenibilidad del proceso (Anuar et al., 2016). En cambio, el proceso químico mediante pirólisis se presenta como una opción más eficiente y económica, ya que puede restaurar la energía contenida en el plástico (Zadgaonkar, 2006).

En conclusión, la conversión de residuos plásticos en combustibles sintéticos mediante pirólisis y su simulación en Aspen Plus representa una solución prometedora para mitigar el impacto ambiental de los residuos plásticos, al tiempo que se generan productos valiosos como combustibles líquidos. Los estudios previos han proporcionado valiosos conocimientos sobre los aspectos técnicos y operativos del proceso, lo que sienta las bases para futuras investigaciones que busquen mejorar la eficiencia y la rentabilidad de esta tecnología.

METODOLOGÍA

Este estudio se llevará a cabo bajo un paradigma cuantitativo, utilizando un diseño experimental. El paradigma cuantitativo, según Arias (2019), se centra en la medición objetiva y el análisis estadístico de datos para establecer relaciones causales entre variables. El diseño experimental, como señala Hernández et al. (2014), permite manipular variables independientes (en este caso, las condiciones de operación del proceso de conversión de

HDPE) para observar su efecto en la variable dependiente (la producción de combustibles sintéticos).

Simulación en Aspen Plus ®

La simulación del proceso de obtención de combustibles sintéticos a partir de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) se realizará utilizando el software Aspen Plus V14. Este software es ampliamente reconocido en la industria química y de procesos por su capacidad para modelar y simular sistemas complejos, incluyendo procesos de conversión de polímeros.

La metodología para la simulación en Aspen Plus ® se basará en investigaciones previas y mejores prácticas en la simulación de procesos de conversión de plásticos. Se seguirán los siguientes pasos:

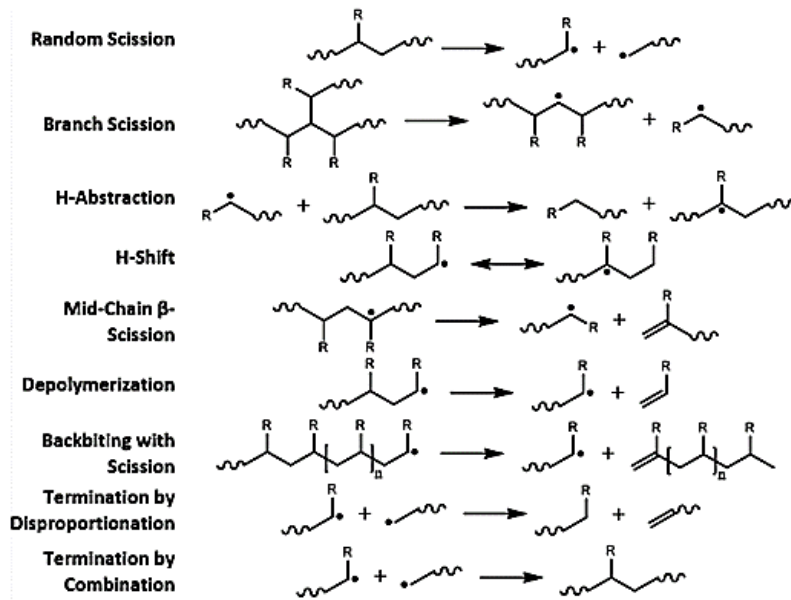
1. **Recopilación de datos:** Se recopilarán datos sobre las propiedades del HDPE, las condiciones de operación del proceso (temperatura, presión, flujo, etc.) y las características de los combustibles sintéticos deseados.
2. **Desarrollo del modelo:** Se propone un modelo detallado del proceso en Aspen Plus ®, incluyendo la unidad de reacción con las corrientes de materiales y energía, y las propiedades termodinámicas de las sustancias involucradas.
3. **Análisis de resultados:** Se analizará los resultados obtenidos de la simulación en Aspen Plus ®, considerando parámetros clave como el rendimiento del proceso..

Reacciones químicas de la Pirólisis

Según (Aspen Technology, 2025), el mecanismo de la pirólisis se basa en reacciones típicas de la química radical, que incluyen etapas de iniciación, propagación y terminación. La Figura 3 ilustra las principales reacciones radicalarias que ocurren durante este proceso. En el caso del HDPE, el grupo R representado en dicha figura corresponde a un átomo de hidrógeno, como también se observa en la Figura 1.

Figura 1

Mecanismos radicales de las reacciones de pirólisis



Fuente: (Aspen Technology, 2025)

Los principales mecanismos de reacción involucrados en la degradación de polímeros incluyen procesos de escisión, transferencia de hidrógeno y terminación de radicales. La escisión aleatoria implica la ruptura homolítica de enlaces en la cadena polimérica, generando fragmentos más cortos con radicales en sus extremos, mientras que la escisión de ramificación ocurre en puntos de ramificación, produciendo un radical central y otro terminal. La abstracción de hidrógeno y el desplazamiento de hidrógeno permiten la transferencia o migración de átomos de hidrógeno entre radicales y cadenas, modificando la ubicación de los radicales. La β -escisión rompe enlaces entre átomos en posiciones α y β respecto a un radical, generando cadenas con dobles enlaces y radicales terminales.

Por otro lado, la despolimerización libera monómeros desde extremos con radicales activos, mientras que el retroceso con escisión combina la abstracción de hidrógeno con una posterior β -escisión. Los mecanismos de terminación incluyen la desproporción, donde dos radicales transfieren hidrógeno entre sí, resultando en cadenas inactivas con grupos terminales

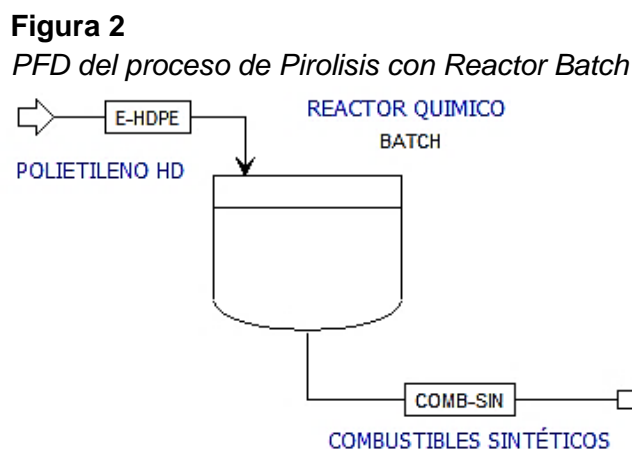
saturados e insaturados, y la combinación, que une dos cadenas radicales en una sola estructura inactiva. Estos mecanismos son fundamentales para comprender la degradación y el reciclaje de polímeros en procesos de simulación química.

Según (Aspen Technology, 2025), La pirólisis se puede diferenciar en tres tipos según la temperatura a la que se lleva a cabo: lenta, rápida y flash. La **pirólisis lenta** se realiza a temperaturas moderadas, entre 350 y 450 °C, mientras que la **pirólisis rápida** opera en un rango más alto, de 500 a 800 °C. En el caso de la **pirólisis flash**, las temperaturas alcanzan aproximadamente los 1000 °C.

Estudio de caso: Pirólisis del HDPE

En este estudio, se realizó la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con un peso molecular promedio (M_{Wn}) de 125,000 y un índice de polidispersidad (PDI) de 2, utilizando el software Aspen Plus V14, según la metodología propuesta por Aspen Technology (2022). El análisis de sensibilidad permitió estimar la temperatura óptima para maximizar la conversión de HDPE en combustibles sintéticos, obteniendo resultados que contribuyen a la mejora del proceso.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo propuesto:



Fuente: Elaboración propia en base a herramientas de aspen PLUS v14, febrero 2025.

Las condiciones del flujo de alimentación de E-HDPE al reactor BATCH son detalladas en las Tablas 1.

Tabla 1

Variables independientes de proceso Flujo E-HDPE

N:	Flujo	Parámetros	Valor	Componentes	Fracción Molar
1	E-HDPE	Temperatura	246,265 °C	C2=	0,0004
2		Presión	1 bar	HDPE	0,9996
3		Flujo Molar	353.676 lbmol/h	H2O	-

Fuente: *Elaboración propia, febrero 2025.*

La Tabla 2 presenta las condiciones operacionales del reactor químico BATCH, detallando parámetros clave como temperatura, presión y otros factores críticos que influyen en la reacción.

Tabla 2

Configuración del Reactor Químico (BATCH)

N°	VARIABLES	E-REACT
1	Temperatura Constante	460 °C
2	Fase de Producto	Líquido
3	Tiempo de Residencia	3 Horas
4	Ciclo Total de tiempo	360 Segundo

Fuente: *Elaboración propia, febrero 2025.*

La Tabla 3 presenta las especies químicas de bajo peso molecular en el modelo de HDPE, fundamentales para entender sus propiedades y comportamiento en el proceso.

Tabla 3

Componentes de bajo peso molecular en el modelo de HDPE

Número de Carbono	Tipo Parafínico	Tipo olefínico	Tipo Diolefínico
1	C1		

2	C2	C2=	
3	C3	C3=	
4	C4	C4=	C4==
5	C5	C5=	C5==
6	C6	C6=	C6==
7	C7	C7=	C7==
8	C8	C8=	C8==
9	C9	C9=	C9==
10	C10	C10=	C10==
11	C11	C11=	C11==
12	C12	C12=	C12==
13	C13	C13=	C13==
14	C14	C14=	C14==
15	C15	C15=	C15==
16	C16	C16=	C16==
17	C17	C17=	C17==
18	C18	C18=	C18==
19	C19	C19=	C19==
20	C20	C20=	C20==

Fuente: (Aspen Technology, 2025)

La Tabla 4 describe las reacciones químicas y el tipo involucrados en el proceso de pirólisis del HDPE, esenciales para comprender su descomposición molecular durante la pirólisis. Esta información es crucial para el estudio, control y optimización de la producción de productos derivados.

Tabla 4

Reacciones químicas de la pirólisis de HDPE

	Active	Reacción	Reactantes	Productos
1	Verdadero	Random scission	D_n	$\rightarrow P_m^E + P_{n-m}^E$
2	Verdadero	H-abstraction	$P_n^E + D_m$	$\rightarrow D_n + P_m^M$
3	Verdadero	H-shift	P_n^E	$\leftrightarrow P_n^M$

4	Verdadero	Mid-chain beta scission	P_n^M	->	$D_m^= + P_{n-m}^E$
5	Verdadero	Depolymerization	P_n^E	->	$P_{n-1}^E + M$
6	Verdadero	Termination by disproportionation	$P_n^E + P_m^E$	->	$D_n + D_m^=$
7	Verdadero	Termination by combination	$P_n^E + P_m^{(E^M)}$	->	D_{n+m}

Fuente: (Aspen Technology, 2025)

En la Tabla 5 se presentan los valores de pre-exponencia, los cuales fueron ajustados para concordar con los datos experimentales, partiendo de los valores iniciales de todos los parámetros obtenidos en el trabajo previo realizado por Levine y Broadbelt. (Aspen Technology, 2025).

Tabla 5

Constantes de velocidad para la pirólisis de HDPE

	Reaction	Segment 1	Segment 2	Pre-Exp	Act-Energy	Act-Volume
				1/sec	J/kmol	cum/kmol
1	Random scission	ETH	ETH	9,00E+16	375555960	0
2	H-abstraction	ETH	ETH	275000000	46892160	0
3	H-shift	ETH	ETH	1E+10	76618440	0
4	Mid-chain beta scission	ETH	ETH	5,35E+14	120998520	0
5	Depolymerization	ETH	ETH	1,29E+12	118905120	0
6	Termination by disproportionation	ETH	ETH	1,1E+10	9629640	0
7	Termination by combination	ETH	ETH	1,1E+11	9629640	0

Fuente: (Aspen Technology, 2025)

Una vez que se han simulado los diagramas de flujo correspondientes al caso de estudio, se procede a validar los resultados obtenidos mediante el software simulador Aspen PLUS. A continuación, estos resultados se someten a un análisis en términos de cantidad y pureza utilizando el simulador industrial Aspen PLUS V14.

RESULTADOS

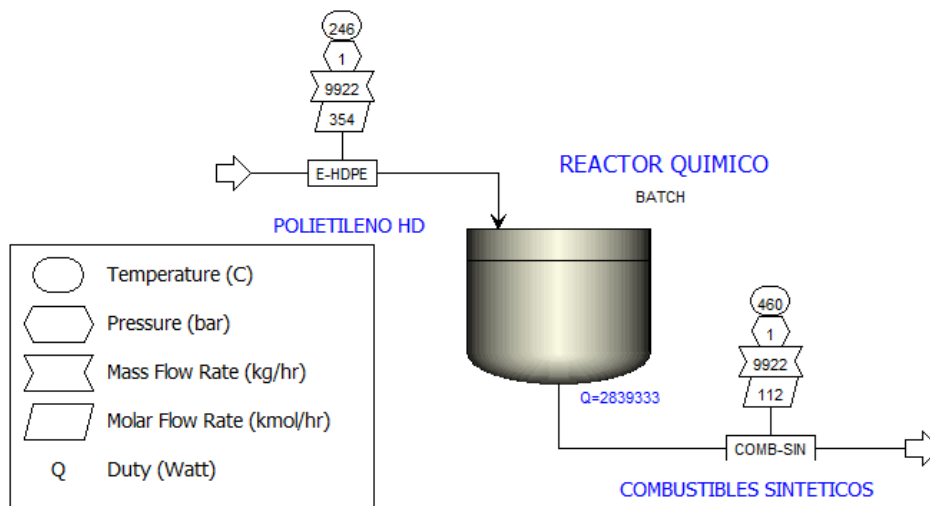
Los resultados de la simulación confirmaron la efectividad del proceso de pirólisis para convertir residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) en una mezcla de hidrocarburos líquidos. Se logró una conversión notable del HDPE en productos líquidos con un alto valor calorífico, adecuados para su uso como combustibles. La optimización detallada del proceso fue fundamental para maximizar la eficiencia operativa y reducir al mínimo la producción de subproductos no deseados.

a) Resultados de balance de materia

El Balance de Materia proporciona información clave sobre la cantidad de material que ingresa, sale y se acumula en el sistema, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de flujo de proceso con Reactor Batch en aspen PLUS V14



Fuente: Aspen PLUS V14, Mercado, enero 2023.

$$\sum \dot{m}_{Entrada} = \sum \dot{m}_{Salida}$$

$$\dot{m}_{E-HDPE} = \dot{m}_{COM-SIN} = 9921,9299 \text{ kg/h}$$

Tabla 6*Resultados de balance de materia del reactor químico (REACTOR)*

N°	VARIABLES OPERACIONALES	E-HDPE	COMB-SIN
1	Fase de flujo	Líquido	Líquido
2	Temperatura [°C]	246,26	460,00
3	Presión [Bar]	1,00	1,00
4	Flujo Molar [kgmol/h]	353,68	112,367
5	Flujo Masico [kg/hr]	9921,9299	9921,9299
6	Peso Molecular [MW]	28,05	88,2992
7	Entalpia Molar (kJ/kmol)	-37821,5034	-28077,0924
8	Entalpia Másica (kJ/kg)	-1348,17947	-317,976822
9	Entropía Molar (kJ/kmol-K)	-183,04524	-322,644568

Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025.

- **Interpretación de los resultados de la simulación del reactor químico**

La simulación de la pirólisis de HDPE en Aspen PLUS V.14 mostró que el flujo permanece en fase líquida en la entrada y salida del reactor, indicando que las condiciones de temperatura y presión no alcanzan los puntos críticos para la fase gaseosa. La temperatura aumenta de 246,26 °C en la entrada a 460,00 °C en la salida, reflejando un proceso endotérmico. La presión se mantiene constante a 1 bar, en condiciones isobáricas.

El flujo molar disminuye de 353,68 kgmol/h a 112,37 kgmol/h, mientras que el flujo másico permanece constante en 9921,93 kg/h, sin pérdidas de masa. El peso molecular promedio aumenta de 28,05 a 88,30, indicando la formación de compuestos más pesados. La entalpía molar disminuye de -37821,50 kJ/kmol a -28077,09 kJ/kmol, y la entalpía másica baja de -1348,18 kJ/kg a -317,98 kJ/kg, lo que refleja la absorción de energía y menor contenido energético en los productos. La entropía molar aumenta de -183,05 kJ/kmol-K a -322,64 kJ/kmol-K, indicando mayor desorden molecular en los productos.

Tabla 7*Resultados de composición molar del reactor químico (REACTOR)*

Nº	COMPONENTES	E-HDPE	COMB-SIN
1	C2=	0,0004	0,0602
2	HDPE	0,9996	0,0388
3	C1	0,0000	0,0549
4	C2	0,0000	0,0829
5	C3	0,0000	0,0714
6	C4	0,0000	0,0617
7	C5	0,0000	0,0526
8	C6	0,0000	0,0443
9	C7	0,0000	0,0369
10	C8	0,0000	0,0306
11	C9	0,0000	0,0254
12	C10	0,0000	0,0210
13	C11	0,0000	0,0176
14	C12	0,0000	0,0147
15	C13	0,0000	0,0125
16	C14	0,0000	0,0107
17	C15	0,0000	0,0093
18	C16	0,0000	0,0082
19	C17	0,0000	0,0073
20	C18	0,0000	0,0065
21	C19	0,0000	0,0059
22	C20	0,0000	0,0055
23	C3=	0,0000	0,0463
24	C4=	0,0000	0,0396
25	C5=	0,0000	0,0335
26	C6=	0,0000	0,0281
27	C7=	0,0000	0,0233
28	C8=	0,0000	0,0193
29	C9=	0,0000	0,0160

30	C10=	0,0000	0,0132
31	C11=	0,0000	0,0110
32	C12=	0,0000	0,0092
33	C13=	0,0000	0,0078
34	C14=	0,0000	0,0067
35	C15=	0,0000	0,0058
36	C16=	0,0000	0,0051
37	C17=	0,0000	0,0045
38	C18=	0,0000	0,0041
39	C19=	0,0000	0,0037
40	C20=	0,0000	0,0034
41	C4==	0,0000	0,0070
42	C5==	0,0000	0,0059
43	C6==	0,0000	0,0049
44	C7==	0,0000	0,0040
45	C8==	0,0000	0,0033
46	C9==	0,0000	0,0028
47	C10==	0,0000	0,0023
48	C11==	0,0000	0,0019
49	C12==	0,0000	0,0016
50	C13==	0,0000	0,0013
51	C14==	0,0000	0,0012
52	C15==	0,0000	0,0010
53	C16==	0,0000	0,0009
54	C17==	0,0000	0,0008
55	C18==	0,0000	0,0007
56	C19==	0,0000	0,0006
57	C20==	0,0000	0,0006

Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025.

- **Interpretación de los resultados de composición molar de productos obtenidos**

La simulación en Aspen PLUS V.14 permitió analizar la composición molar de los productos obtenidos de la pirólisis de polietileno de alta densidad expandido (E-HDPE). En la

entrada, el E-HDPE tiene una fracción molar predominante de 0,9996, confirmando que el reactor procesa principalmente este polímero. En la salida, se observa una variedad de hidrocarburos, tanto saturados (C1-C20) como insaturados (C2=, C3=, C4=, etc.), además de dienos (C4==, C5==, etc.), evidenciando la descomposición térmica del HDPE en moléculas más pequeñas.

Los productos pirolíticos más destacados incluyen etileno (C2=) con 0,0602, metano (C1) con 0,0549 y etano (C2) con 0,0829, compuestos útiles para la síntesis de otros productos. También se observa que los hidrocarburos más grandes se descomponen en moléculas más pequeñas, lo que concuerda con el proceso de craqueo térmico. La presencia de olefinas y dienos sugiere que la pirólisis favorece la formación de compuestos insaturados, valiosos en la industria petroquímica. Sin embargo, una fracción residual de HDPE (0,0388) en la salida indica que no todo el polímero se convierte, lo que podría deberse a limitaciones operativas del reactor.

- **Balance de Energía**

En el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE), realizaste un balance de energía basado en la variación de la entalpía. Los valores de entalpía a la entrada y salida del sistema son:

- **Entalpía a la entrada** = -37,821,503.41 J/kmol
- **Entalpía a la salida** = -28,077,092.41 J/kmol

La variación de entalpía (ΔH) se calcula como la diferencia entre la entalpía de salida y la de entrada:

$$\Delta H = H_{\text{salida}} - H_{\text{entrada}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\Delta H = (-28,077,092.41 \text{ J/kmol}) - (-37,821,503.41 \text{ J/kmol})$$

Simplificando:

$$\Delta H = -28,077,092.41 \text{ J/kmol} + 37,821,503.41 \text{ J/kmol}$$

$$\Delta H = 9,744,411.00 \text{ J/kmol}$$

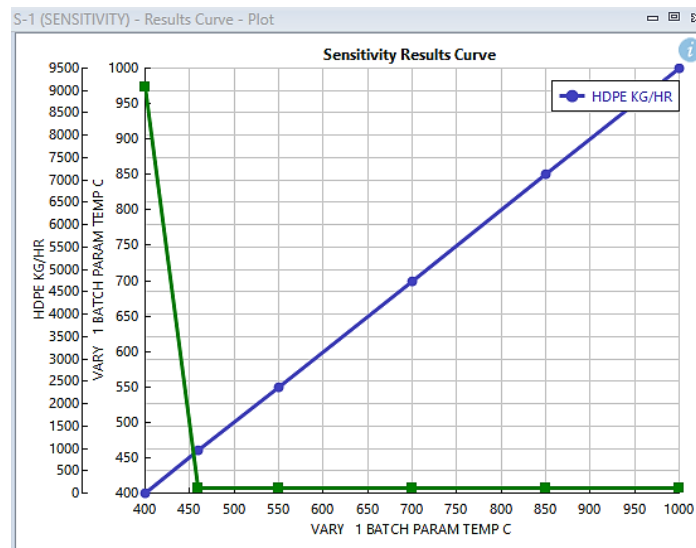
Este valor positivo $\Delta H = 9,744,411.00 \text{ J/kmol}$ indica que el sistema absorbe energía durante el proceso. La pirolisis de HDPE es un proceso endotérmico, lo que significa que requiere energía para romper los enlaces entre los átomos de carbono e hidrógeno en el polímero, lo que permite la formación de productos más pequeños como gases y líquidos.

b) Interpretación de resultado gráfico

En el desarrollo de esta investigación, se realizaron dos análisis de sensibilidad. El primero, representado en la Figura 3, reveló que la temperatura óptima se encuentra en 460°C , con un tiempo de residencia ideal de 3 horas, considerando un flujo de materia prima de 9921.93 kg/h .

Figura 4

Análisis de sensibilidad considerando la temperatura ($^\circ\text{C}$), el tiempo de residencia (segundos) y el flujo másico de entrada (kg/h)

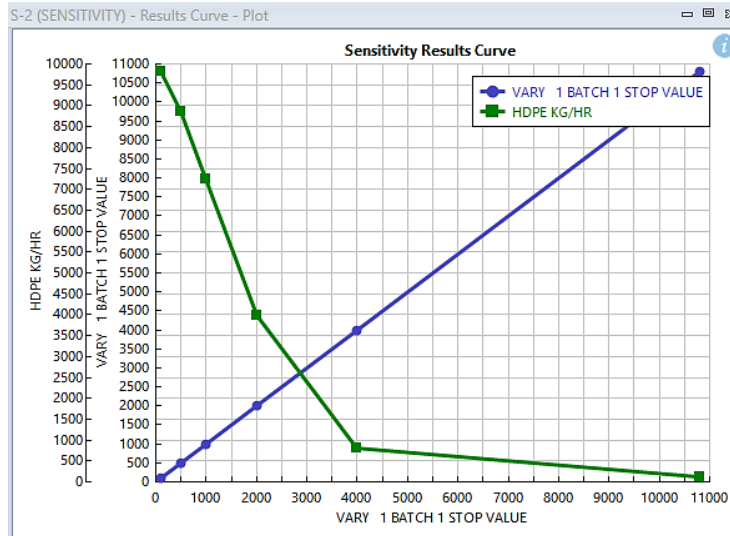


Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025

La Figura 4 presenta el segundo análisis de sensibilidad, en el que se evaluó el flujo másico de entrada de polietileno de alta densidad, también de 9921.93 kg/h, en relación con el consumo del reactor batch durante un tiempo de operación de 3 horas.

Figura 5

Análisis de sensibilidad considerando el flujo masico de entrada (kg/h) y Tiempo de residencia (Seg.)

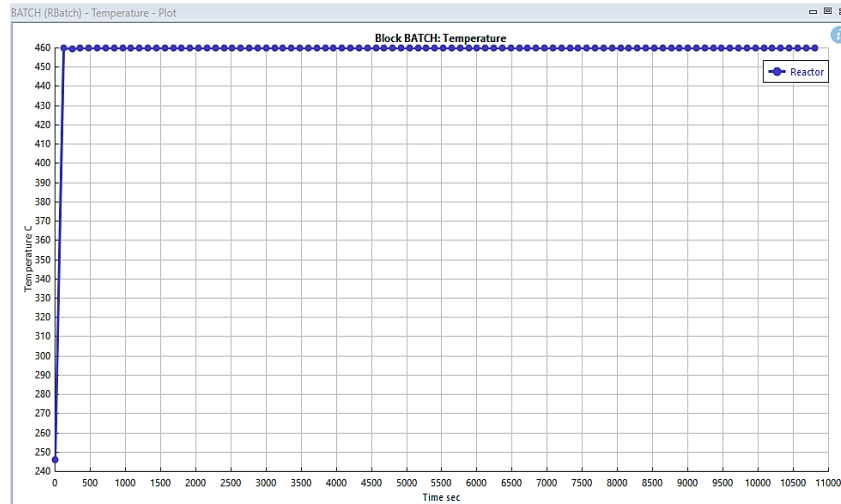


Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025

La Figura 5 muestra el análisis de la temperatura en función del tiempo, destacando que las condiciones óptimas para el proceso se alcanzan a 460°C y 10,800 segundos, lo cual es crucial para maximizar el rendimiento y la eficiencia del proceso.

Figura 6

Análisis de Diagrama temperatura vs tiempo

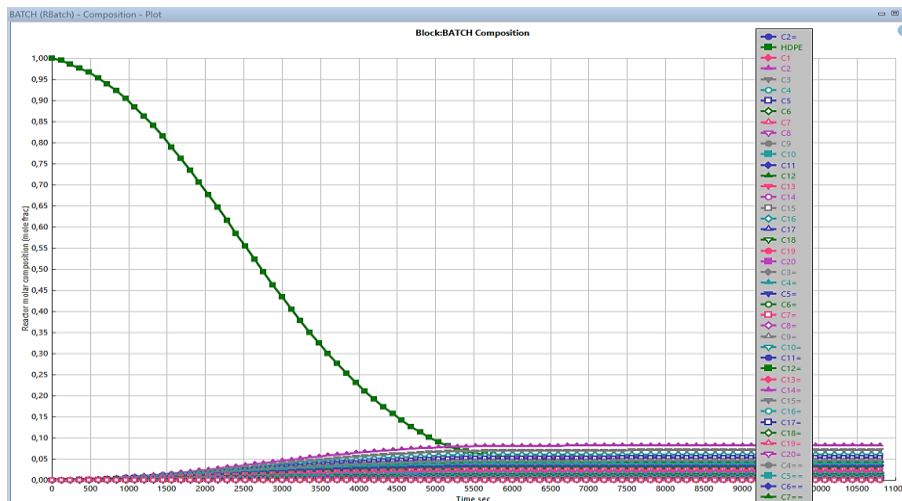


Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025.

La Figura 6 muestra el consumo de HDPE a 460°C durante 10,800 segundos, ilustrando la relación entre la pureza de la materia prima y el tiempo de procesamiento, esencial para optimizar la pirólisis. En la Figura 7, el segundo análisis de sensibilidad evalúa el flujo másico de HDPE (9921,93 kg/h) en relación con el consumo del reactor batch durante 3 horas.

Figura 7

Pureza (Fracción Molar) vs Tiempo de residencia (Seg.)



Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen PLUS V.14, febrero 2025

El tiempo de permanencia en el reactor tiene una influencia considerable sobre la calidad del producto, aunque implica un mayor consumo de energía. Por ello, es fundamental encontrar un balance entre el tiempo de residencia y la temperatura óptima en el proceso de pirólisis del polietileno de alta densidad.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación evidencian una relación directa entre las condiciones operativas del proceso de pirólisis y el rendimiento de los productos obtenidos. El incremento de la temperatura influye significativamente en la distribución de las fracciones líquidas y gaseosas, coincidiendo con Palmay, Medina y Vargas (2021), quienes reportaron que al aumentar la temperatura de 350 a 450 °C, disminuye la fracción líquida y aumenta la fracción gaseosa. Identificaron que la temperatura óptima para maximizar el rendimiento de la fracción líquida (67.85 %) es de 400 °C, con un tiempo de residencia de 6 minutos y una tasa de calentamiento de 13 °C/min.

Por otro lado, Rejas et al. (2015) señalaron que el rendimiento en la producción de hidrocarburos líquidos varía según el tipo de polímero, con el polipropileno y el poliestireno alcanzando rendimientos cercanos al 70 %, mientras que el polietileno de alta y baja densidad presenta alrededor del 20 %. Sin embargo, en este estudio se observó un mayor rendimiento para el polietileno de alta densidad (HDPE), lo cual podría atribuirse a diferencias en las condiciones experimentales, como la configuración del reactor, la tasa de calentamiento o el análisis de los productos.

Finalmente, Amar Gil, Ardila Arias y Barrera Zapata (2019) destacaron la factibilidad técnica de la valorización de residuos plásticos mediante pirólisis y la comparabilidad de los productos obtenidos con combustibles convencionales. Mientras su estudio utilizó la versión 8.7 de Aspen Plus, con limitaciones en la modelación de reacciones complejas, esta investigación

empleó la versión 14, que permitió simulaciones más realistas y precisas gracias al análisis de sensibilidad y modelos cinéticos actualizados.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la viabilidad de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) para la producción de combustibles sintéticos, utilizando simulaciones en Aspen Plus V14. Los resultados evidencian que, bajo condiciones óptimas de temperatura (460 °C) y tiempo de residencia (3 horas), se logra una conversión eficiente del HDPE en hidrocarburos líquidos de alto valor calorífico, con una composición predominante de olefinas y parafinas. La simulación confirmó que el proceso es endotérmico, requiriendo un aporte energético significativo, lo que resalta la importancia de optimizar el balance energético para mejorar la sostenibilidad del proceso.

La investigación aporta avances significativos en el campo de la valorización de residuos plásticos, ofreciendo una alternativa prometedora para la gestión sostenible de desechos y la producción de combustibles renovables. Sin embargo, se identificaron limitaciones, como la presencia de HDPE residual en los productos, lo que sugiere la necesidad de ajustes en las condiciones operativas o el diseño del reactor.

REFERENCIAS

Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 306-326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>

Anuar, S., Shafferina, D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). Revisión de la pirólisis de los desechos plásticos. *Energía Convers. Manag*, 115, 308-326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>

- Arias, F. G. (2019). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6ta ed.). Episteme.
- Aspen Technology. (2025, octubre). Knowledge center. Obtenido de Pyrolysis of High-Density Polyethylene:
https://knowledgecenter.aspentech.com/item/kb/kA04P0000008NhtSAE?idx=7&AT_EPReference=Aspen%20Plus&AT_EVReference=14
- Conesa, J. A., Marcilla, A., Font, R., & Caballero, J. A. (1996). Thermogravimetric studies on the thermal decomposition of polyethylene. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 36(1), 1–15.
[https://doi.org/10.1016/0165-2370\(95\)00917-5](https://doi.org/10.1016/0165-2370(95)00917-5)
- Crespo, J. (2019). Viabilidad de conversión de plásticos en combustible mediante el calor producido en un parque de colectores Fresnel.
- Fernández, B., López, V., & Ortega, M. (2017). Simulation and analysis of HDPE pyrolysis using Aspen Plus. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 205-214.
- Gao, F. (2010). Pyrolysis of waste plastics into fuels. (tesis doctoral). University of Canterbury, Nueva Zelanda. Accedido: Sep. 23, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://scihub.ren/http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/4303>
- García, P., & Torres, A. (2020). Advances in pyrolysis technology for plastic waste treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109385.
- Gómez, T., Vázquez, L., & Molina, R. (2016). Pyrolysis as an alternative for plastic waste management: A technical and environmental review. *Waste Management*, 58, 121-133.
- Hernández, P., Morales, F., & Castro, E. (2021). High-efficiency catalytic pyrolysis of HDPE for liquid fuel synthesis. *Fuel Science & Technology International*, 39(2), 87-102.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill.

- Jiménez, H., & Vargas, O. (2020). Application of kinetic models in Aspen Plus for HDPE pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119731.
- Li, Z., Zhong, Z., Zhang, B., Wang, W., Seufitelli, G. V. S., & Resende, F. L. P. (2020). Catalytic fast co-pyrolysis of waste greenhouse plastic films and rice husk using hierarchical micro-mesoporous composite molecular sieve. *Waste Management*, 102, 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.012>
- López, J., Pérez, R., & Castillo, M. (2018). Environmental impact of high-density polyethylene waste and its valorization through pyrolysis. *Journal of Sustainable Energy*, 25(3), 134-145.
- Martínez, L., Gómez, D., & Herrera, J. (2021). High-density polyethylene pyrolysis for liquid fuel production: A review. *Fuel Processing Technology*, 210, 106567.
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 1032–1040. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.019>
- Moinuddin, S., Mamunor Mohammad, R., Rashid Mohammed M., & Muhammad S. R. (2012). Proponen una nueva tecnología para reciclar plásticos de desecho en combustible de hidrocarburos en EE. UU. *Int. J. Energy Environ.*, 3, 749-760.
- Ordoñez-Agreto, K. A., Coral-Coral, D. F., Rodríguez-Páez, J. E., Diosa, J. E., & Mosquera-Vargas, E. (2023). Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 29-42. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023003>
- Palmay, P., Medina, C., & Vargas, K. (2021). Pirólisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(3), 2463. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.464

- Pérez, F., Ramírez, J., & Soto, H. (2022). Optimization of pyrolysis parameters for HDPE conversion into fuels. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132378.
- Plastics Europe, G. M. R., & Conversio Market & Strategy GmbH. (2019). *Plastics - the facts 2019* (p. 14, 35). <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos, 30, 137-144.
- Ramírez, C., & Ortiz, P. (2023). Modelling pyrolysis of plastic waste for sustainable fuel production. *Energy & Fuels*, 37(4), 2789-2802.
- Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635-642. Recuperado el 7 de febrero de 2025, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-87872015000100005&lng=es&tlng=es
- Rodríguez, C., & Sánchez, E. (2019). Thermochemical conversion of plastic waste: A case study on HDPE. *Energy Conversion and Management*, 200, 112038.
- Rojas, A., & Medina, D. (2018). Environmental assessment of pyrolysis-derived fuels from plastic waste. *Renewable Energy*, 126, 919-930.
- Salazar, D., Pauca, R., & Cochachi, A. (2024). Obtención de combustible líquido a partir de residuos plásticos. *Prospectiva Universitaria*, 1, 105-110. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2022.19.1960>
- Zhang, B., Zhong, Z., Li, T., Xue, Z., Wang, X., & Ruan, R. (2018). Biofuel production from distillers dried grains with solubles (DDGS) co-fed with waste agricultural plastic mulching films via microwave-assisted catalytic fast pyrolysis using microwave absorbent and hierarchical ZSM-5/MCM-41 catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 130(February), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.007>

Zadgaonkar, A. (2006). Proceso y equipos para la conversación de residuos plástico en combustibles. En J. Scheirs (Ed.), Reciclaje de Feedstock y Pirolisis de los plásticos de residuos (cap. 27). Canadá. <https://doi.org/101002/0470021543ch27>