

Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica

Pyrolysis of polyethylene terephthalate and polystyrene for the synthesis of carbon nanostructures: a bibliometric review

Katerine A. Ordoñez-Agredo ^{1a}, Diego F. Coral-Coral ^{1b}, Jorge E. Rodríguez Páez ^{1c}, Jesús E. Diosa ^{2a, 3}, Edgar Mosquera-Vargas ^{2b, 3}

¹ CYTEMAC, Departamento de Física, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Orcid: [0000-0001-7078-2368](https://orcid.org/0000-0001-7078-2368) ^b, [0000-0002-7694-6746](https://orcid.org/0000-0002-7694-6746) ^c. Correos electrónicos: kordonez@unicauca.edu.co ^a, dfcoral@unicauca.edu.co ^b, jnpaez@unicauca.edu.co ^c

² Grupo de Transiciones de Fase y Materiales Funcionales, Departamento de Física, Universidad del Valle, Colombia. Orcid: [0000-0002-1919-1922](https://orcid.org/0000-0002-1919-1922) ^a, [0000-0003-1561-6994](https://orcid.org/0000-0003-1561-6994) ^b. Correos electrónicos: [Jesús.diosa@correounivalle.edu.co](mailto:Jesus.diosa@correounivalle.edu.co) ^a, edgar.mosquera@correounivalle.edu.co ^b

³ Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM), Universidad del Valle, Colombia.

Recibido: 10 octubre, 2022. Aceptado: 12 enero, 2023. Versión final: 9 marzo, 2023.

Resumen

Este artículo se presenta una revisión bibliométrica del proceso de pirólisis de dos tipos de polímeros: tereftalato de polietileno y poliestireno (PET y PS, por sus siglas en inglés), para identificar las condiciones necesarias y así optimizar el proceso de pirólisis, garantizando la producción mayoritaria del producto gaseoso con el objetivo de llevar a cabo un segundo proceso, el crecimiento de nanoestructuras de carbono. Precursores gaseosos como el metano, acetileno y etileno son hidrocarburos esenciales para el crecimiento de dichas nanoestructuras, de las que se destacan según la literatura, una variedad de nanotubos de carbono de pared simple, de pared doble, y de pared múltiple (SWCNT, DWCNT y MWCNT, por sus siglas en inglés) y nano fibras de carbono (CNF, por sus siglas en inglés). En este trabajo se realiza un análisis de las condiciones más relevantes para optimizar el proceso de pirólisis de polímeros, es decir, disminuir la temperatura y tiempos de reacción y mejorar la composición de los productos obtenidos del proceso pirolítico. Finalmente se dan a conocer los reportes más relevantes de la pirolisis de los polímeros expuestos en la literatura.

Palabras clave: desechos plásticos; pirólisis; nanocarbones.

Abstract

This article presents a bibliometric review of the pyrolysis process of two types of polymers: polyethylene terephthalate (PET) and polystyrene (PS), to identify the necessary conditions to optimize the pyrolysis process, guaranteeing the

majority production of the gaseous product with the aim of carrying out a second process, the growth of carbon nanostructures. Gaseous precursors such as methane, acetylene, and ethylene are essential hydrocarbons for the growth of said nanostructures, of which a variety of single-walled, double-walled, and multi-walled carbon nanotubes (SWCNTs, DWCNTs, and MWCNTs) stand out according to the literature and carbon nanofibers (CNFs). In this work, an analysis of the most relevant conditions is carried out to optimize the polymer pyrolysis process, that is, to reduce the temperature and reaction times to improve the composition of the products obtained from the pyrolytic process. Finally, the most relevant reports of the pyrolysis of the polymers exposed in the literature are disclosed.

Keywords: plastic waste; pyrolysis; nanocarbons.

1. Introducción

En el desarrollo de un estilo de vida moderno el uso de los plásticos tiene gran importancia, ya que se han convertido en un material imprescindible en muchos sectores [1], tales como el sector médico, alimenticio, industrial, doméstico, en la construcción, en la agricultura y el embalaje, sectores en los cuales se requieren materiales que presenten propiedades físicas específicas como durabilidad y baja densidad [2]. Bajo este contexto, el material plástico ha mejorado la calidad de vida de las personas, además, ha aumentado la demanda de producción y consumo global generando un número significativo de toneladas de plásticos a nivel global. Sin embargo, un gran porcentaje de estos materiales plásticos terminan en vertederos [3], ver figura 1.

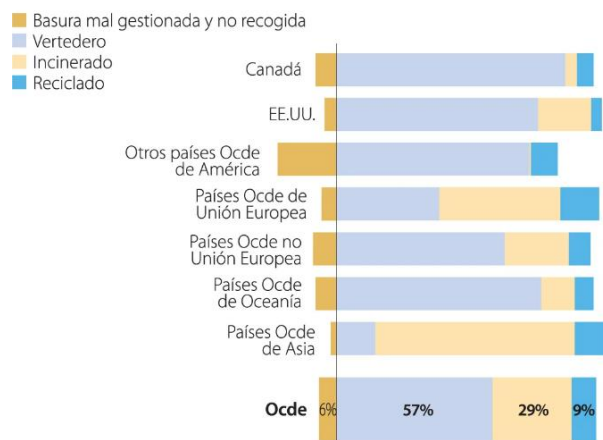


Figura 1. Producción de plástico a nivel mundial desde 1950 al 2020. Fuente: [3].

Por lo tanto, del gran número de toneladas producidas anualmente, hay un número significativo de desechos plásticos que no reciben un tratamiento adecuado, cuyo destino son los vertederos, mares, y océanos; mientras otra cantidad es sometida a un proceso de incineración a cielo abierto, liberando contaminantes nocivos, no solo para el ser humano, sino también para la vida silvestre y el medio ambiente (figura 1).

Una forma de mitigar el impacto ambiental es el reciclaje y el uso de estos plásticos como materia prima para obtener nuevos materiales, dado la precariedad de los métodos convencionales. De esta manera, se hace necesario la aplicación de métodos novedosos que permitan darle una utilidad a este significativo número de desechos plásticos. Cabe resaltar que, el proceso de reciclaje para este tipo de residuos abarca cuatro métodos principales: (i) un método primario, enfocado en la re-extrusión de desechos y con el cual se obtiene un producto de calidad equivalente; (ii) un método secundario o mecánico en el que se degrada el material reciclado; (iii) un método terciario donde hay una transformación química; y (iv) un método cuaternario, donde se da la recuperación de energía [4].

Así, solo el nivel de reciclaje primario y el nivel de reciclaje secundario, se han establecido de manera formal [5], porque aún existen grandes desafíos para la implementación a gran escala de un tipo de reciclaje terciario y cuaternario. Los desafíos son en una parte del tipo tecnológico puesto que en el reciclaje terciario, se realiza un proceso de despolimerización, proceso mediante el cual se rompen las cadenas del polímero en cadenas de monómeros, para luego ser utilizadas como materia prima en la producción de nuevos productos químicos, así mismo, en el reciclaje cuaternario, se lleva a cabo un proceso de recuperación de energía, para la producción de hidrocarburos alifáticos y aromáticos como una alternativa de combustible [1].

Sin embargo, los métodos de reciclaje químico están abriendo nuevos caminos, con el fin de utilizar residuos plásticos, como un potencial precursor en la generación de productos de alto valor, para diversas aplicaciones industriales y comerciales, siendo la pirólisis una de las tecnologías de mayor interés científico, por su potencial para convertir plásticos en combustible o en cualquier otro producto de valor agregado, como las nanoestructuras carbonosas, específicamente los nanotubos de carbono CNT, dado que estos nanomateriales pueden explorarse para diversas aplicaciones, y su generación no solo corresponde a una ruta prometedora en términos de tecnología de reciclaje, sino también en términos de sostenibilidad.

De esta manera, la revisión bibliométrica reporta que diferentes formas de nanotubos de carbono se pueden sintetizar mediante el reciclaje de polímeros. Desde su descubrimiento en 1991 por Iijima [6], los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés), con sus propiedades químicas, mecánicas y térmicas han generado un gran interés en el campo de la ciencia y la ingeniería, dado la amplia gama de aplicaciones entre las que se destacan: su aplicación en la purificación de gas, en el tratamiento de aguas residuales, en la captura de dióxido de carbono, en sensores, en el almacenamiento de energía, en supercondensadores y en revestimientos [7] para nombrar algunos.

Además, la existencia de varios métodos físicos y químicos para investigar la degradación de los polímeros, y estos van desde métodos sin cambios en las propiedades físicas y químicas del polímero hasta los procesos de degradación para la recuperación de monómeros [8]. Entre los que se destacan diferentes tipos de degradación: 1) la degradación térmica, 2) la degradación termo catalítica, 3) la degradación oxidativa, 4) la degradación termo oxidativa, 5) la degradación fotoquímica, y 6) la degradación foto oxidativa; con la característica común de generar cambios irreversibles en la estructura del polímero. Cabe resaltar que la descomposición de la estructura de los polímeros da como resultado la disminución del peso molecular y los cambios significativos en las propiedades físicas y químicas [9]. Así, entre los métodos ampliamente conocidos y estudiados se destaca la degradación térmica y el termo catalítico, denominados en la literatura como reciclaje químico [10].

En consecuencia, este artículo se enfoca en una revisión de la literatura científica basada en el reciclaje químico, para dos tipos de polímeros, el tereftalato de polietileno y el poliestireno (PET y PS, por sus siglas en inglés) utilizando la pirólisis como proceso de degradación de polímeros, a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno. Los resultados obtenidos en cada uno de los registros contribuyen a formar una base informativa para investigaciones futuras, enmarcadas en la pirólisis de plásticos, donde el rendimiento y calidad del producto depende en gran medida de la configuración de parámetros como, la temperatura, el tipo de reactor, el tiempo de residencia, el uso del catalizador, y la atmósfera inerte respectivamente.

En este trabajo se hará un recorrido de análisis bibliométrico con la finalidad de comprender las posibilidades que tienen los polímeros como el PET y PS como materia prima para la generación de nanoestructuras carbonosas en un proceso pirolítico. Después, se profundizará en las condiciones necesarias

para optimizar el proceso y se continuará con la revisión de las técnicas utilizadas para mejorar dicho proceso. Finalmente, se presentarán los aspectos más relevantes encontrados en la revisión.

2. Metodología

La revisión bibliométrica se basó en artículos científicos, empleando los siguientes motores de búsqueda: Lens org, Google Scholar, Scopus, Scielo y Library Génesis, con las siguientes palabras claves: “PET pyrolysis” y “PS pyrolysis”. La revisión inicia con el motor de búsqueda Lens org, con el fin de hacer un barrido internacional, utilizando las palabras claves ya mencionadas, para las obras académicas, sin filtros temporales y de esta manera registrar la evolución a través del tiempo. Aquí se observa un incremento en la producción científica relacionada a patentes, con una alta tasa de aumento (ver figura 2).

Se obtuvo los siguientes campos de estudio referentes a esta palabra clave, donde predomina “ciencia de los materiales” con 531 publicaciones, “pirólisis” con 322 y “PET” o “tereftalato de polietileno” con 102 resultados (ver figura 3).

Como producto de esta revisión bibliométrica se destaca, principalmente, la descripción de las condiciones más relevantes para llevar a cabo el proceso de pirólisis para dos tipos de polímeros: el PET y PS, con el fin de identificar los parámetros que optimizan el proceso en la generación de productos gaseosos.

Sin embargo, entre los parámetros de mayor relevancia que influyen en el rendimiento del proceso de pirólisis se destacan: la materia prima o el tipo de plástico, el tipo de reactor, la temperatura de operación, el tiempo de operación y la presencia del catalizador.

3. La pirólisis

La etimología de la palabra pirolisis está compuesta por dos partes, una parte que es “piro”, que significa fuego o calor, y “lisis” que significa ruptura o descomposición, lo que la define como la ruptura o descomposición por efecto del fuego o del calor [12]. Esto puede conducir a un proceso de degradación térmica, por ejemplo, de una biomasa, en una atmósfera inerte libre de agentes oxidantes [13]. La biomasa se define como cualquier material orgánico no fosilizado y biodegradable, que proviene de plantas, animales y microorganismos, incluidos productos, residuos y desechos de la agricultura e industrias relacionadas [12].

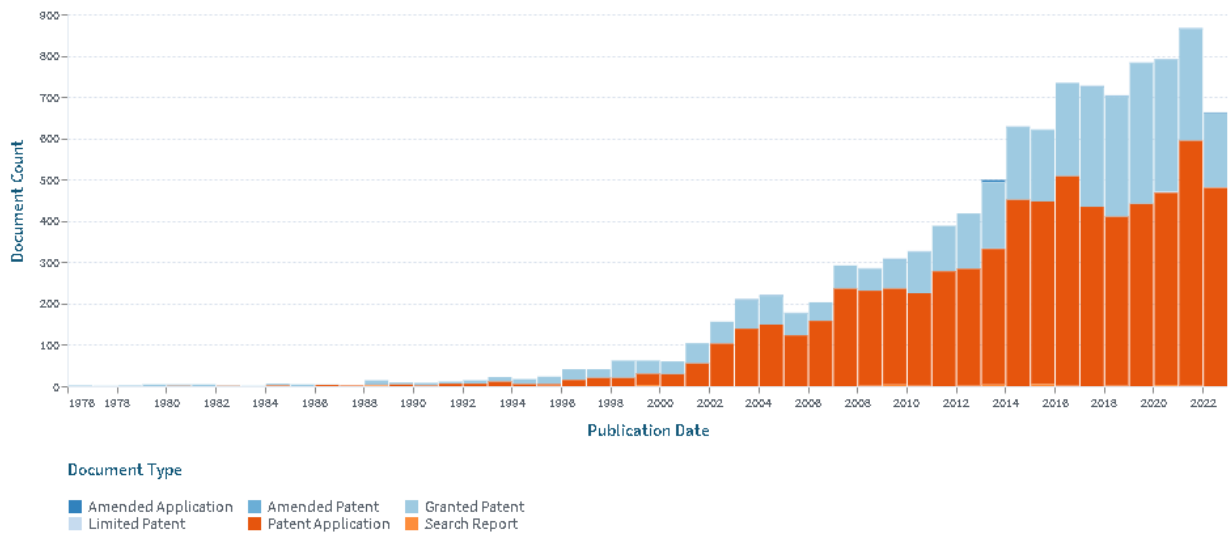


Figura 2. Evolución temporal de obras académicas. Fuente: [11].

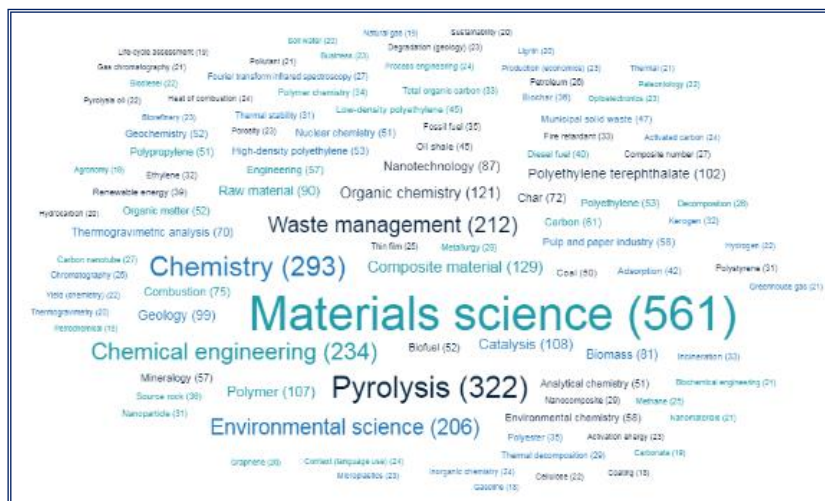


Figura 3. Principales campos de estudio. Fuente: [11].

Por lo tanto, en la distribución y caracterización de los productos de la pirolisis, influyen las condiciones de la reacción y parámetros como la temperatura, el tipo de biomasa, las condiciones y características de la atmósfera donde se realiza el tratamiento, la tasa de calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor [14]. Este proceso se puede categorizar en tres formas generales: pirolisis lenta, media y rápida, dependiendo de la velocidad de transferencia de calor y el tiempo de residencia de la biomasa que es sometida a una temperatura dada; la temperatura puede ser baja (< 400 °C), media (400 – 600 °C) o alta (> 600 °C) [15].

La pirolisis lenta se realiza a bajas temperaturas, el tiempo de calentamiento es muy largo y la velocidad a la que se alcanza la temperatura de trabajo es muy lenta. Este proceso también se conoce como carbonización y

tiene como objetivo obtener un biocombustible sólido. En la pirolisis media, realizada a temperaturas entre 400 y 600 °C, se obtienen como productos metanos e hidrocarburos superiores y en la pirolisis alta, en la que la velocidad de calentamiento para alcanzar la temperatura de trabajo es muy alta, el tiempo de retención del proceso es muy corto y el principal producto que se obtiene es un biocombustible líquido [16].

De esta manera este proceso se define como una reacción de degradación química causada por la energía térmica en una atmósfera inerte, es decir, en ausencia de oxígeno. La degradación del polímero se logra calentándolo a altas temperaturas, para que las macromoléculas se rompan en fragmentos más pequeños, que consisten en valiosas mezclas de hidrocarburos: gas, líquido y sólido.

4. La materia prima

La materia prima en mención corresponde a desechos plásticos, polímeros orgánicos que consisten en moléculas formadas por un gran número de unidades repetitivas conocidas como monómeros [17]. Estos polímeros se clasifican según su estructura y grado de polimerización como [18]:

- Polímeros lineales: una sola cadena lineal de monómeros.
- Polímeros ramificados: cadena lineal con cadenas laterales.
- Polímeros reticulados: dos o más cadenas unidas por cadenas laterales.

Por lo tanto, los polímeros se pueden clasificar en termoplásticos y termoestables, esto en función de su comportamiento térmico. Los termoplásticos se ablandan cuando se calientan, se endurecen y adoptan la forma del molde, entre los termoplásticos se encuentran el poliestireno PS, el polietileno PE y el polipropileno PP, cloruro de polivinilo PVC y tereftalato de polietileno PET. Es importante mencionar que los termoplásticos constituyen el 80 % del plástico que se produce actualmente [19].

Por otro lado, los termoestables son polímeros cuyas cadenas individuales han sido unidas por cadenas laterales o reticuladas. Estos polímeros normalmente existen inicialmente como líquidos [20].

El objetivo de este trabajo se enfoca en dos tipos de polímeros: el tereftalato de polietileno (PET) y el poliestireno (PS).

El PET se define como un poliéster, perteneciente al grupo de los termoplásticos, obtenido a partir de una reacción de poli condensación entre el ácido tereftálico (TA) o dimetil tereftalato (DMT) y el etilenglicol [21], cuya estructura se presenta en la tabla 1. Es un plástico puro y muy resistente, con diferentes presentaciones que se diferencian entre sí por tener diferentes pesos moleculares y cristalinidad.

Este tipo de plásticos se pueden procesar mediante sistemas de soplado, inyección y extrusión, obteniéndose un material resistente al desgaste por fricción y colisión, con propiedades de deslizamiento, así como de impermeabilización, lo que impide el paso de CO₂, O₂ y la humedad [22]. Corresponde a uno de los plásticos más versátiles utilizados actualmente, dado que se utilizan para aplicaciones unidimensionales (1D) como fibras, para aplicaciones bidimensionales (2D) como películas y

en aplicaciones tridimensionales (3D) como botellas. Es importante mencionar que dos tercios de la producción de este polímero se utilizan para filamentos y fibras cortadas, las cuales son utilizadas para textiles, alfombras, cuerdas para neumáticos, y cinturones de seguridad; por otro lado, las películas y botellas se utilizan principalmente como materiales de embalaje en la industria alimentaria, esto dado que las botellas de PET han reemplazado en muchos casos a las botellas de vidrio [22].

El PS es un polímero transparente al que se le puede introducir colorantes y está compuesto por monómeros de estireno obtenidos de la petroquímica líquida. Se compone de una larga cadena de hidrocarburos con grupos fenilo [23], cuya estructura química se consigna en la tabla 1, al igual que el PET, la mayoría de los desechos de PS se depositan en los vertederos y no se reciclan debido a los problemas encontrados al separar y limpiar el poliestireno, situación que crea una amenaza para el medio ambiente, causando daños en seres humanos, en la vida silvestre y en la vida acuática. Por lo tanto, es importante convertir el PS en productos valiosos mediante un proceso de pirólisis.

Tabla 1. Estructura química de los polímeros

Polímero	Estructura química
PET	
PS	

Además, la materia prima correspondiente a los polímeros PET y PS, permite obtener una aproximación de los productos esperados del proceso de pirólisis; mediante el análisis próximo de los mismos, que permite determinar la presencia de cuatro componentes en cada uno de los polímeros: la materia volátil, el carbono fijo, el contenido de humedad y el contenido de cenizas [24], sin embargo, en el proceso de pirólisis la materia volátil y el contenido de cenizas influyen directamente en el rendimiento del producto líquido, es así como las investigaciones respaldan que la cantidad de materia volátil favorece la producción de una cantidad significativa de aceite de pirólisis [25].

Ejemplo de ello es el proceso de pirólisis al que se sometió el tereftalato de polietileno PET, a una temperatura de 500 °C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en un reactor de lecho fijo, bajo una atmósfera de nitrógeno, se obtuvo como resultado un

rendimiento del producto líquido menor al producto gaseoso, con un porcentaje en peso significativo de producto gaseoso alrededor de 76.9 % [25]. Es importante mencionar que el bajo rendimiento del producto líquido se debe al porcentaje del material volátil del análisis aproximado, ver la [tabla 2](#), que registra un contenido volátil de 86.83 %, un porcentaje menor comparado con el PS cuyo contenido volátil es superior al 90 %. De esta manera, el PET se convierte en una buena alternativa para la obtención de un producto gaseoso mayoritario, comparado con el producto líquido y sólido.

Por otro lado, el poliestireno PS, como ya se mencionó presenta un porcentaje significativo de contenido volátil, lo que da una aproximación de que el producto mayoritario del proceso de pirólisis sea el producto líquido. Ejemplo de ello es el proceso al que se sometió este polímero, en un reactor autoclave presurizado a una temperatura de 425 °C, con una velocidad de 10 °C/min, durante un tiempo de 60 min de reacción, produciendo un alto rendimiento en peso de aceite líquido alrededor del 97 % y un bajo porcentaje de gas alrededor de 2.5 % [26]. De esta manera, el poliestireno PS se convierte en una alternativa para la obtención de un producto líquido mayoritario.

5. El tipo de reactor

En la investigación de la pirólisis de plásticos se han utilizado muchos sistemas de reactores, en los que se destacan (ver [tabla 3](#)).

- El reactor discontinuo [27]
- El reactor de lecho fijo [28]
- El reactor fluidizado [29]
- El reactor de lecho con pico cónico [30]

En el diseño del reactor y en los parámetros de reacción afectan criterios fundamentales durante el proceso de pirolisis como [31]: La transferencia de calor efectiva desde el entorno de reacción al sistema catalizador/plástico y las interacciones efectivas entre los

restos de descomposición plástica con las partículas del catalizador [32].

La temperatura de operación se cataloga como uno de los factores más importantes e influyentes durante el proceso de pirólisis, dado que el rendimiento de los productos obtenidos, depende en gran medida de la temperatura mantenida durante el proceso [33]. Sin embargo, al aplicar la temperatura se lleva a cabo la degradación térmica y tiene lugar el rompimiento de las cadenas poliméricas de la materia prima. De esta manera, el rango de temperatura para la degradación del PS durante el proceso de pirólisis es de alrededor de 350 – 500 °C, mientras que para la degradación del PET es de alrededor de 500 – 600 °C [34].

En consecuencia, Si el producto deseado es gaseoso o carbonizado, se recomienda una temperatura superior a 500 °C, mientras si es aceite líquido, se recomienda un rango de temperatura relativamente más bajo de 300 – 500 °C [34].

6. El tiempo de reacción

El tiempo de reacción es un factor dependiente de la temperatura, es un indicativo del tiempo que se requiere para que el reactor esté a la temperatura deseada, para obtener el rendimiento de los productos. Durante este lapso de tiempo, la cadena del polímero se rompe y se da la formación de los productos [34].

7. El catalizador

La incursión del catalizador en el proceso pirolítico, ha tenido una evolución y tiene su inicio en la década de 1980 [35], donde se crea la necesidad de mejorar los productos obtenidos del proceso. Sin embargo, la estructura de los hidrocarburos producidos puede modificarse mediante el uso de catalizadores. Esto dado que el proceso de pirolisis catalítico consume menos energía que el proceso no catalítico o térmico y da como resultado la formación de más hidrocarburos de cadena ramificada.

Tabla 2. Análisis próximo del PET y del PS




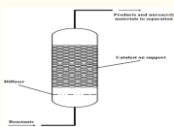
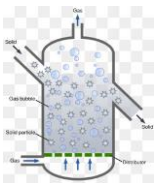
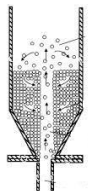
Tipo de plástico	Humedad (% en peso)	Carbono fijo (% en peso)	Contenido Volátil (% en peso)	Ceniza (% en peso)	Ref.
 PET	0.61	13.17	86.83	0.02	[10]
 PS	0.30	0.20	99.50	0	[11]

Tabla 3. Tipos de reactores para la pirólisis del PET y PS

Reactor discontinuo	Ventajas	Desventajas	Referencia
	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema cerrado en el que no hay entrada ni salida de reactivos y subproductos durante la reacción. - Produce alta eficiencia de conversión al permitir que los reactivos permanezcan en el reactor durante un período más largo. 	<ul style="list-style-type: none"> - La adición de catalizador causa la formación y acumulación de coque en la superficie del catalizador, lo que disminuye la eficiencia del catalizador con el paso del tiempo y un alto residuo en el proceso. Además, de la separación de los residuos del catalizador al final de la reacción. 	[27]
Reactor de lecho fijo			
	<ul style="list-style-type: none"> - Es un reactor de diseño simple 	<ul style="list-style-type: none"> -No permite la alimentación de materia prima con tamaño de partícula irregular, dado que puede causar problemas durante el proceso de alimentación. 	[28]
Reactor de lecho fluidizado	Ventajas		
	<ul style="list-style-type: none"> - El catalizador se distribuye uniformemente sobre una placa distribuidora y el gas fluidificante se sopla a través de él, llevando así las partículas en un estado fluidizado. De esta manera, la eficiencia catalítica aumenta ya que el catalizador se mezcla bien con el fluido de carga proporcionando una gran superficie para llevar a cabo la reacción. - Mejora la tasa de transferencia de calor durante la pirólisis. - Se considera el mejor reactor que puede emplearse en la planta piloto debido a su bajo costo operativo y operación a gran escala 		[29]
Reactor de lecho De pico cónico	Ventajas	Desventajas	
	<ul style="list-style-type: none"> -Menor debilitamiento, una tasa de transferencia de calor más alta y maneja sólidos pegajosos de manera eficiente. - El diseño del lecho con boquilla es adecuado para realizar pirólisis a baja temperatura para producir cera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige que se instalen muchas bombas en el reactor, lo que aumenta exorbitantemente los costes operativos. 	[30]

De esta manera el uso de los catalizadores en el proceso de pirólisis, aceleran la velocidad de la reacción, maximizan el rendimiento de los productos, reducen la temperatura y el tiempo de reacción [36], en consecuencia, reduce el gasto energético, razón por la cual son utilizados ampliamente en las industrias, con el fin de optimizar la distribución de los productos y aumentar la selectividad del producto [37].

Los primeros catalizadores utilizados en el proceso fueron la sílice, la zeolita tipo Y, y la alúmina. En la década de 1990 se llevaron a cabo estudios utilizando como catalizadores sílice-alúmina [38], zeolitas [37], catalizadores de craqueo comerciales a base de zeolitas, materiales meso porosos y arcillas [36]. De este modo, los tipos de catalizadores para el proceso de pirólisis, se clasifican en catalizadores homogéneos y heterogéneos [38].

Tabla 4. Catalizadores homogéneos y heterogéneos

Catalizador homogéneo	Catalizador heterogéneo
Se encuentran en la misma fase, que las sustancias que entran en la fase de la reacción	Se encuentran en una fase diferente a la fase de la mezcla de la reacción
Fase	
Principalmente en fase líquida	En tres fases; fase sólida, fase líquida o fase gaseosa
Estabilidad térmica	
Poca	Alta
Recuperación del catalizador	
Difícil y costosa	Fácil y económica
Sitio activo	
Funcionan mejor en condiciones de baja temperatura menores a 250 °C	Funcionan mejor en condiciones de alta temperatura mayores a 250 °C
Reciclaje de catalizador	
Difícil	Fácil
Separación del catalizador	
Difícil	Fácil
Dependencia de la temperatura	
Funcionan mejor en condiciones de baja temperatura menores a 250 °C	Funcionan mejor en condiciones de alta temperatura mayores a 250 °C
Modificación del catalizador	
Fácil	Difícil

Fuente: [38].

Dadas las características expuestas en la [tabla 4](#), se observa que, en el proceso de pirólisis, se prefiere el uso de los catalizadores heterogéneos a 250 °C, por su economía, la reutilización del mismo, y la facilidad de la separación del producto líquido y el catalizador en fase sólida en la fase final [38].

Sin embargo, los catalizadores más utilizados en el proceso de pirólisis para polímeros como el PET y PS se destaca la zeolita. Además, el catalizador más utilizado en la industria son los aluminosilicatos cristalinos con una estructura micro porosa bien definida. Estructuralmente, la zeolita tiene tetraedros de SiO₄ y AlO₄ como unidades de estructura primaria que se unen a través de átomos de oxígeno compartidos en una estructura 3D. Adicionalmente, también son utilizados metales como el níquel y el paladio, y catalizadores de sílice y alúmina [39].

Además, los productos del proceso de pirólisis se pueden utilizar como materia prima para nuevos productos o combustibles.

Ejemplo de ello es el producto gaseoso para el crecimiento de nanoestructuras carbonosas, cuyo precursor es el producto gaseoso, tal como el metano, el etileno y el acetileno.

Por lo tanto, la variación de los parámetros en el proceso pirolítico de los polímeros influye en la cantidad y composición de los productos obtenidos, como se muestra en el anexo 1.

8. Conclusión

Esta revisión bibliométrica da a conocer parte de la variedad de investigaciones, que se han enfocado en el estudio del potencial que tiene el proceso de pirólisis para polímeros, específicamente el tereftalato de polietileno (PET) y el poliestireno (PS) para obtener productos de gran valor agregado. Cabe resaltar que el proceso de pirólisis corresponde a una tecnología de reciclaje químico prometedora, que aprovecha el alto contenido de carbono en polímeros de desecho, con el fin de lograr una producción rentable de nanomateriales de carbono.

Tabla 5. Reporte de las condiciones de la pirólisis del PET

Polimero	Catalizador	Condiciones del proceso	Referencia			
PET virgen (Peso molecular promedio 300,000)	No	Flujo de gas de trabajo (H ₂): 5 – 3.75 Nm ³ /h. Flujo de alimentación de PET: 12 g/min – 20 g/min. Potencia de entrada: 7 – 27 KW. Anodo: Cu Catodo: W	[40]			
		Productos de la pirólisis				
		Sólidos		Líquidos	Gases	
		No Indica		No Indica	Acetileno:42 % CO: 53 % Etileno: 4 %	
PET virgen (15 g)	Si Zeolita tipo A4	*Flujo de gas de trabajo (N ₂): 250 ml/min. *Temperatura: 500 °C. *El tiempo de reacción de 20 min *La proporción de catalizador/plástico: 5 g de catalizador/ 15 g de PET *Tasa de calentamiento de 15 °C/min	[41]			
		Productos de la pirólisis				
		Sólidos		Líquidos	Gases	
		No Indica		No Indica	Gas total: 43 %	
PET virgen (3 mm x 3mm)	Si Vanadatos y vanaditos de Lutecio, Lantano y Gadolinio	Temperatura de 750 °C Atmósfera de nitrógeno La proporción de catalizador/plástico mezcla de plástico con el catalizador de 2 g Tasa de calentamiento de 15 °C/min	[42]			
		Productos de la pirólisis				
		Sólidos/líquidos		Gases		
		No Indica		LuVO ₄ CO: 52 % H ₂ : 18 %		
				LuVO ₃ CO: 82 % H ₂ : 11%		
				GdVO ₄ CO ₂ : 8 % CO:7% CH ₄ : 8 % C ₂ H ₄ :12 %		
				GdVO ₃ CO ₂ : 8% CO:7% CH ₄ :8% C ₂ H ₄ :12 %		
				LaVO ₄ CO ₂ :12 % CO: 9 % CH ₄ :15 % C ₂ H ₄ :16 %		
LaVO ₃ CO ₂ :12% CO:8% CH ₄ :15% C ₂ H ₄ :17%						
Mezcla de carbón y PET reciclado (3 mm x 3 mm)	No	La mezcla de carbón y PET reciclado maneja las siguientes proporciones carbón / PET: 95/5, 90/10 Y 80/20 Mezcla carbón- PET=100 g Reactor de cuarzo de 60mm de diámetro y 500 mm de longitud Temperatura de 470 °C – 530 °C Atmosfera de nitrógeno La velocidad de calentamiento de 5 °C /min y 15 °C/min	[43]			
		Productos de la pirólisis				
		Sólidos		Líquidos	Gases	
		No Indica		No Indica	Proporción carbón/PET: 80/20 CO ₂ : 11.20 % CO: 11.73 % CH ₄ : 24.81 % C ₂ H ₄ : 2.90 % C ₂ H ₆ : 2.92 % C ₃ H ₈ : 0.88 % H ₂ : 42.13 %	
Los pellets de PET de 3 mm x 2.5 mm x 2 mm	No	Velocidad de calentamiento 25 °C/min La temperatura de 500 °C, 550 °C y 600 °C Reactor de lecho de pico cónico Consta de una tolva conectado a una válvula accionada neumáticamente, que mide y extrae el sólido con una velocidad de alimentación de 1.5 g/min de plástico. Flujo de nitrógeno = 28 L/min	[44]			

		<p>Se utiliza un ciclón y un filtro para eliminar las partículas finas del producto gaseoso Se hace seguimiento del flujo de producto gaseoso utilizando cromatografía de gases (GC) y Micro GC.</p>													
		<p align="center">Productos de la pirólisis</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sólidos</th> <th>Líquidos</th> <th colspan="2">Gases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T = 500 °C 35.46 % T = 550 °C 36.59 % T = 600 °C 40.61 %</td> <td>T = 500°C 12.82 % T = 550°C 13.54 % T = 600 °C 6.25 %</td> <td>T = 500 °C 42.78 % CO:9,88% CO₂:29,28% C₂H₄:3.09 % C₃H₆:0.37 % C₄H₆:0.16 % %</td> <td>T = 550 °C 45.60 % CO: 17.90 % CO₂:23,89 % C₂H₄:3.53 % C₃H₆:0.06 % C₄H₆:0.22 % %</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2">T = 600°C 49.10 % CO:14.21 % CO₂:31.08 % C₂H₄:3.35 % C₃H₆:0.22 % C₄H₆:0.24 %</td> </tr> </tbody> </table>	Sólidos	Líquidos	Gases		T = 500 °C 35.46 % T = 550 °C 36.59 % T = 600 °C 40.61 %	T = 500°C 12.82 % T = 550°C 13.54 % T = 600 °C 6.25 %	T = 500 °C 42.78 % CO:9,88% CO ₂ :29,28% C ₂ H ₄ :3.09 % C ₃ H ₆ :0.37 % C ₄ H ₆ :0.16 % %	T = 550 °C 45.60 % CO: 17.90 % CO ₂ :23,89 % C ₂ H ₄ :3.53 % C ₃ H ₆ :0.06 % C ₄ H ₆ :0.22 % %			T = 600°C 49.10 % CO:14.21 % CO ₂ :31.08 % C ₂ H ₄ :3.35 % C ₃ H ₆ :0.22 % C ₄ H ₆ :0.24 %		
Sólidos	Líquidos	Gases													
T = 500 °C 35.46 % T = 550 °C 36.59 % T = 600 °C 40.61 %	T = 500°C 12.82 % T = 550°C 13.54 % T = 600 °C 6.25 %	T = 500 °C 42.78 % CO:9,88% CO ₂ :29,28% C ₂ H ₄ :3.09 % C ₃ H ₆ :0.37 % C ₄ H ₆ :0.16 % %	T = 550 °C 45.60 % CO: 17.90 % CO ₂ :23,89 % C ₂ H ₄ :3.53 % C ₃ H ₆ :0.06 % C ₄ H ₆ :0.22 % %												
		T = 600°C 49.10 % CO:14.21 % CO ₂ :31.08 % C ₂ H ₄ :3.35 % C ₃ H ₆ :0.22 % C ₄ H ₆ :0.24 %													
PET reciclado de 5mm x 5mm 0.4 g	Si ZnCl ₂	<p align="center">Condiciones del proceso</p> <p>*Atmosfera de nitrógeno *La temperatura 700 °C *La velocidad de calentamiento utilizada fue 10 °C/min *Tiempo de reacción 30 min</p> <p align="center">Productos de la pirólisis</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sólidos</th> <th>Líquidos</th> <th>Gases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>42 %</td> <td>58 %</td> </tr> </tbody> </table>	Sólidos	Líquidos	Gases	-	42 %	58 %	[45]						
Sólidos	Líquidos	Gases													
-	42 %	58 %													
PET y PVC reciclado	No	<p align="center">Condiciones del proceso</p> <p>*Atmosfera de nitrógeno *Flujo de gas de trabajo: 100 cm³/min *La temperatura 500 °C *La velocidad de calentamiento 10 °C/min *Reactor de lecho fijo *Cantidad de muestra: 15 mg *La fase líquida se recogió en trampas frías mantenidas a unos 0 °C utilizando hielo salado</p> <p align="center">Productos de la pirólisis</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sólidos</th> <th>Líquidos</th> <th>Gases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 %</td> <td>18.5 %</td> <td>76.9 %</td> </tr> </tbody> </table>	Sólidos	Líquidos	Gases	5 %	18.5 %	76.9 %	[46]						
Sólidos	Líquidos	Gases													
5 %	18.5 %	76.9 %													
LDPE, PP y PET post consumo, lavado y secado a un horno de vacío a 50 °C. Las muestras se cortaron de 2 mm de dimensión	No	<p align="center">Condiciones del proceso</p> <p>*Temperatura: 500 °C *Tasa de calentamiento: 6, 8,10, 12 y 14 °C/min, se obtuvo porcentajes diferentes en los productos para cada tasa de calentamiento. *Reactor de lecho fijo. *Atmosfera de Nitrógeno *Corriente de escape para conducir el producto de pirólisis al condensador. * El producto líquido se recogió en una botella de muestra líquida</p> <p align="center">Productos de la pirólisis</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sólidos</th> <th>Líquidos</th> <th colspan="2">Gases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6 °C/min 8,98 % 8 °C/min 8.12 % 10 °C/min 7.64 % 12 °C/min 6.61 % 14 °C/min 5.74 %</td> <td>6 °C/min 38.89 % 8 °C/min 34.16 % 10 °C/min 32.13 % 12 °C/min 30.33 % 14 °C/min 29.14 %</td> <td>6 °C/min 8 °C/min 10 °C/min 12 °C/min 14 °C/min</td> <td>52.13 % 57,72 % 60.23 % 63.03 % 65.12 %</td> </tr> </tbody> </table>	Sólidos	Líquidos	Gases		6 °C/min 8,98 % 8 °C/min 8.12 % 10 °C/min 7.64 % 12 °C/min 6.61 % 14 °C/min 5.74 %	6 °C/min 38.89 % 8 °C/min 34.16 % 10 °C/min 32.13 % 12 °C/min 30.33 % 14 °C/min 29.14 %	6 °C/min 8 °C/min 10 °C/min 12 °C/min 14 °C/min	52.13 % 57,72 % 60.23 % 63.03 % 65.12 %	[47]				
Sólidos	Líquidos	Gases													
6 °C/min 8,98 % 8 °C/min 8.12 % 10 °C/min 7.64 % 12 °C/min 6.61 % 14 °C/min 5.74 %	6 °C/min 38.89 % 8 °C/min 34.16 % 10 °C/min 32.13 % 12 °C/min 30.33 % 14 °C/min 29.14 %	6 °C/min 8 °C/min 10 °C/min 12 °C/min 14 °C/min	52.13 % 57,72 % 60.23 % 63.03 % 65.12 %												
PET virgen 3mm x 3mm	Si Zeolita (ZSM-5, en inglés Zeolite Secony Mobil – 5) y NiCl ₂	<p align="center">Condiciones del proceso</p> <p>*Atmosfera de nitrógeno *La temperatura 450 °C – 600 °C *La velocidad de calentamiento utilizada fue 10 °C/min *Gas de arrastre Argón *Reactor tubular horizontal 60 mm (DI) 1000 mm (L) *Tiempo de reacción 30 min *El condensador se conectó aguas abajo del tubo de cuarzo y se vinculó con un dispositivo que usaba etanol como líquido congelado en el interior *Los volátiles generados por pirólisis de PET se condensaron en el condensador y se hicieron fluir al matraz para ser recolectados.</p> <p align="center">Productos de la pirólisis</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sólidos</th> <th>Líquidos</th> <th>Gases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ZSM-5 600 °C 15 % NiCl₂: 600 °C</td> <td>ZSM-5: 600 °C 25 %</td> <td>ZSM-5: 600 °C 60 %</td> </tr> </tbody> </table>	Sólidos	Líquidos	Gases	ZSM-5 600 °C 15 % NiCl ₂ : 600 °C	ZSM-5: 600 °C 25 %	ZSM-5: 600 °C 60 %	[48]						
Sólidos	Líquidos	Gases													
ZSM-5 600 °C 15 % NiCl ₂ : 600 °C	ZSM-5: 600 °C 25 %	ZSM-5: 600 °C 60 %													

		3 %	NiCl ₂ : 600 °C 55 %	NiCl ₂ : 600 °C 40 %	
Mezcla de PP, PE, PS, PET y PVC, tamaño de 3mm	Si Zeolita (ZSM-5, en inglés Zeolite Secony Mobil – 5) y Red Mud o residuo de bauxita	Condiciones del proceso			[49]
		*Atmosfera de nitrógeno *La temperatura 440 °C – 500 °C *La velocidad de calentamiento utilizada fue 20°C/min *Gas de arrastre Helio *Proporción 10 g de catalizador/100 g plásticos *Flujo de nitrógeno 1dm ³ /min *los productos no condensados pasan a través de una columna de carbón activado y recogidos en bolsas de plástico Tedlar, para ser analizado por cromatografía de gases			
		Productos de la pirólisis			
		Sólidos	Líquidos	Gases	
		ZSM-5a 400 °C: 40.4 % ZSM-5a 425 °C: 61.2 % ZSM-5a 440 °C: 56.9 % ZSM-5a 460 °C: 54.3 % ZSM-5a 500 °C: 39.8 % Red mud 440 °C: 76.2 % Red mud a 500 °C: 57 %	ZSM-5 a 400 °C: 31.8 % ZSM-5 a 425 °C: 31.3 % ZSM-5 a 440 °C: 40.4 % ZSM-5 a 460 °C: 43.6 % ZSM-5 a 500 °C: 58.4 % CO ₂ : 1.9 % CO: 0.7 % CH ₄ : 10.6 % H ₂ : 1.0 % C ₂ H ₄ : 11.1 % C ₂ H ₆ : 8.6 % Red mud a 440 °C: 21.6 % Red mud a 500 °C: 41.3 %		

Dado que, al usar los residuos plásticos como materias primas, se contribuye a la reducción del costo de la producción, específicamente de nanotubos de carbono, lo que puede acelerar su uso a gran escala. Lo anterior, bajo la variación de parámetros como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el uso de un catalizador, y el tipo de reactor, se puede alcanzar y optimizar el rendimiento de los productos y mejorar la gestión de residuos y por consiguiente contribuir a la reducción de la contaminación. De esta manera la revisión permite determinar el uso de un catalizador para disminuir la temperatura de la pirólisis térmica, para optimizar el producto gaseoso en la pirólisis del PET y el PS.

Financiación

Los autores agradecen al Gobierno de Colombia por el proyecto del SGR BPIN 2020000100377 del Ministerio de Ciencias. También agradecen a la Universidad del Cauca y a la Universidad del Valle por el uso de su infraestructura.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] F. Gao, “Pyrolysis of waste plastics into fuels,” tesis doctoral, University of Canterbury, Nueva Zelanda, 2010, Accessed: Sep. 23, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://sci-hub.ren/http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/4303>
- [2] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao, M. Olazar, “Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 576–596, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>

- [3] “Hoy en día se produce el doble de desechos plásticos en el mundo que hace 20 años.” <https://www.larepublica.co/globoeconomia/hoy-en-dia-se-produce-el-doble-de-desechos-plasticos-en-el-mundo-que-hace-20-anos-3310507>
- [4] V. Sinha, M. R. Patel, and J. V. Patel, “Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review,” *J. Polym. Environ.*, vol. 18, no. 1, pp. 8–25, Sep. 2008, doi: <https://doi.org/10.1007/S10924-008-0106-7>
- [5] S. Al-Salem, A. Antelava, A. Constantinou, G. Manos, A. Dutta, S. Majed Sultan Al-Salem, “Una revisión sobre la pirólisis térmica y catalítica de residuos sólidos plásticos (PSW),” *Rev. medioambiente*, 2017, Accessed: Sep. 23, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- [6] H. D. Lim et al., “Enhanced power and rechargeability of a Li-O₂ battery based on a hierarchical-fibril CNT electrode,” *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 1348–1352, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/ADMA.201204018>
- [7] X. Zang, Q. Zhou, J. Chang, Y. Liu, and L. Lin, “Graphene and carbon nanotube (CNT) in MEMS/NEMS applications,” *Microelectron. Eng.*, vol. 132, pp. 192–206, Jan. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MEE.2014.10.023>
- [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: <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2018.11.004>
- [9] F. A. Gallegos, “Depolimerización de PET (tereftalato de polietileno) mediante bloqueo de escisión de cadena polimérica como alternativa para su reciclaje químico,” trabajo fin de curso, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://scihub.ren/http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/16249>
- [10] K. R. Cardona, “Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos post-consumo,” trabajo fin de programa, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://scihub.ren/https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16986>
- [11] Lens, “Lens Scholarly Search: PET pyrolysis.” [En línea]. Disponible en: https://www.lens.org/lens/search/scholar/list?q=PET%20pyrolysis&p=3&n=10&s=_score&d=%2B&f=false&e=false&l=en&authorField=author&dateFilterField=publishedDate&orderBy=%2B_score&presentation=false&preview=true&stemmed=true&useAuthorId=false&publishedDate.fr
- [12] J. A. Conesa, A. Marcilla, R. Font, and J. A. Caballero, “Thermogravimetric studies on the thermal decomposition of polyethylene,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 36, no. 1, pp. 1–15, Apr. 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(95\)00917-5](https://doi.org/10.1016/0165-2370(95)00917-5)
- [13] M. Castells, “Redes de indignación y esperanza,” 2012, *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, [En línea]. Disponible en: <https://scihub.ren/https://www.academia.edu/download/38935740/art31.pdf>
- [14] A. Demirbas, G. Arin, “Una visión general de la pirólisis de biomasa,” *Energy Sources*, vol. 24, no. 5, pp. 471–482, 2002, [En línea]. Disponible en: <https://scihub.ren/https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0908310252889979>
- [15] J. B. Mooney and S. B. Radding, “Spray pyrolysis processing,” *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 12, pp. 81–101, 1982, doi: <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.MS.12.080182.000501>
- [16] S. Kloss et al., “Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties,” *J. Environ. Qual.*, vol. 41, no. 4, pp. 990–1000, 2012, doi: <https://doi.org/10.2134/JEQ2011.0070>
- [17] F. L. Carrasquero, *Fundamentos de polímeros*. Universidad de los Andes: Merida, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16700/polimeros.pdf;jsessionid=00474486C6264FD54FB5C5BEE429C247?sequence=1>
- [18] I. J. Fernández, “Polímeros en solución y aplicación de los polímeros en la Industria petrolera,” *reviberpol*. [En línea]. Disponible en: <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/08/previos-fernandez.pdf>

- [19] M. Beltrán Rico, A. Marcilla Gomis, *Tecnología de polímeros*. Publicaciones de la Universidad de Alicante: España, 2012.
- [20] M. Sekar, V. Kumar, A. Pugazhendhi, S. Nižetić, T.R. Praveenkumar, “Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design,” vol. 302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046>
- [21] F. Billmeyer, *Ciencia de los polímeros*. Wiley: España, 2020.
- [22] B. Amaya Pinos, “Obtención de combustibles a partir de Tereftalato de Polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación,” trabajo fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [23] A. S. Figueroa-Infante, E. Fonseca-Santanilla, “Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá,” *Épsilon*, vol. 24, 2015.
- [24] G. P. Karayannidis, D. S. Achilias, “Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate),” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 292, no. 2, pp. 128–146, 2007, doi: <https://doi.org/10.1002/mame.200600341>
- [25] S. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. Wan Daud, M. K. Aroua, “A review on pyrolysis of plastic wastes,” *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 308–326, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- [26] Y. Liu, J. Qian, J. Wang, “Pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor to obtain styrene monomer and gasoline fraction,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 45–55, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00066-1)
- [27] Y. Sakata, M. A. Uddin, A. Muto, “Degradation of polyethylene and polypropylene into fuel oil by using solid acid and non-acid catalysts,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, no. 1–2, pp. 135–155, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00013-3)
- [28] J. M. Saad, M. A. Nahil, P. T. Williams, “Influence of process conditions on syngas production from the thermal processing of waste high density polyethylene,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 113, pp. 35–40, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2014.09.027>
- [29] W. Kaminsky, J. S. Kim, “Pyrolysis of mixed plastics into aromatics,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, no. 1–2, pp. 127–134, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00012-1)
- [30] G. Elordi et al., “Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 85, no. 1–2, pp. 345–351, May 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2008.10.015>
- [31] K. Murthy, R. J. Shetty, and K. Shiva, “Plastic waste conversion to fuel: a review on pyrolysis process and influence of operating parameters,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1818892>
- [32] J. M. Heikkinen, J. C. Hordijk, W. De Jong, H. Spliethoff, “Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71, no. 2, pp. 883–900, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2003.12.001>
- [33] S. S. Park, D. K. Seo, S. H. Lee, T. U. Yu, J. Hwang, “Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnace and thermogravimetric analysis reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 97, pp. 29–38, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2012.06.009>
- [34] R. Miandad, M. A. Barakat, M. Rehan, A. S. Aburiazaiza, I. M. I. Ismail, and A. S. Nizami, “Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts,” *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 66–78, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.08.032>
- [35] M. Olazar, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, R. Aguado, J. Bilbao, “Influence of FCC catalyst steaming on HDPE pyrolysis product distribution,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 85, no. 1–2, pp. 359–365, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2008.10.016>
- [36] P. Amar, “Empleo de catalizadores heterogéneos para el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica mediante pirólisis,” tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 2016.
- [37] D. Alviro Dobón, J. J. Manyá Cervelló, C. Di Stasi, “Craqueo y reformado de vapores de pirólisis en un lecho de biochar como catalizador de bajo coste,” trabajo Fin de Master, Universidad de Zaragoza, España, 2018.

- [38] R. N. Martínez, “Pirólisis catalítica de polietileno: estudio de la evolución de la distribución de productos y desactivación del catalizador,” tesis doctoral, Universidad de Alicante (UA), España, 2007.
- [39] F. Botello, E. Camporredondo, and F. Avalos, “Pirólisis del polietileno en presencia y ausencia de catalizadores arcillosos,” *Prospectiva*, vol. 8, no. 1, pp. 95–100, 2010.
- [40] M. Zhang, J. Ma, G. Wen, Q. Yang, B. Su, Q. Ren, “Producción de gas a partir de tereftalato de polietileno mediante plasma de arco rotatorio,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 128, pp. 257–262, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.021>
- [41] C. Li, F. Ataei, F. Atashi, X. Hu, M. Gholizadeh, “Catalytic pyrolysis of polyethylene terephthalate over zeolite catalyst: Characteristics of coke and the products,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 13, pp. 19028–19042, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7078>
- [42] A. Cherednichenko, E. Markova, and ... T. S., “Destrucción termocatalítica de polímeros de poliolefina en presencia de LnVO₃ y LnVO₄,” *Catal. Today*, vol. 379, pp. 80–86, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.03.012>
- [43] M. Havelcová, O. Bičáková, I. Sýkorová, Z. Weishauptová, and A. Melegy, “Caracterización de productos de pirólisis de carbón con adición de tereftalato de polietileno,” *Proces. Combust.*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.022>
- [44] M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, M. Olazar, J. Bilbao, “Operating conditions for the pyrolysis of poly-(ethylene terephthalate) in a conical spouted-bed reactor,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 5, pp. 2064–2069, 2010, doi: <https://doi.org/10.1021/IE900557C>
- [45] T. Maqsood, J. Dai, Y. Zhang, M. Guang, B. Li, “Pirólisis de especies plásticas: una revisión de recursos y productos,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 159, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>
- [46] Ö. Çepelioğullar, A. E. Pütün, “Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life,” *Proceeding Of THE ICOEST’2013*, pp. 694–706, 2013.
- [47] S. FakhrHoseini and M. Dastanian, “Predicción de productos de pirólisis de PE, PP y PET utilizando el modelo de coeficiente de actividad NRTL,” *Journal of Chemistry*, 2013, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/487676>
- [48] H. Jia, H. Ben, Y. Luo, R. Wang, “Catalytic Fast Pyrolysis of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) with Zeolite and Nickel Chloride,” *Polymers*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/polym12030705>
- [49] A. López, I. De Marco, B. Caballero, “Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 104, pp. 211–219, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.030>