

Producción de combustibles a partir de desechos plásticos mediante procesos de reciclado químico

Production of fuels from plastic waste through chemical recycling processes

Gloria María Aponte Figueroa

*Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.*DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199056>

Recibido: 08/03/2023

Aceptado: 23/06/2023

Resumen

La contaminación ambiental en el mundo debido a los desechos plásticos alcanza cada día niveles alarmantes; cerca de ocho millones de toneladas al año de estos desechos terminan en los océanos. Aunque la comunidad científica y académica han tratado de desarrollar y aplicar nuevos métodos y tecnologías para reciclar dichos desechos, actualmente, solo el 15% de los 400 millones de toneladas que se producen anualmente son reciclados. Este trabajo tiene como objetivo presentar un estado del arte sobre las tecnologías de reciclado químico que se encuentran disponibles y aún en etapa de desarrollo para producir combustibles a partir de desechos plásticos. Se aplicó la técnica de revisión bibliográfica para localizar la información de los artículos y las solicitudes de patentes publicados en el periodo 2012-2022; aunada a la técnica de análisis de contenido para procesar y analizar la información, así como la bibliometría para obtener las principales tendencias en el área. Entre los desafíos más importantes que presentan estas tecnologías es que la mayoría requiere de altos consumo de energía y algunas solo procesan desechos homogéneos.

Palabras clave: Producción de combustibles, desechos plásticos, reciclaje de desechos, procesos de conversión, tendencias.

Código UNESCO: 3308.04 - Ingeniería de la contaminación. Código CAPE: 30601002 – Procesos industriales de ingeniería química.

Abstract

Environmental pollution in the world due to plastic waste reaches alarming levels every day; about eight million tons a year of this waste ends up in the oceans. Although the scientific and academic community have tried to develop and apply new methods and technologies to recycle such waste, currently only 15% of the 400 million tons produced annually are recycled. This work aims to present a state of the art on chemical recycling technologies that are available and still in the development stage to produce fuels from plastic waste. The bibliographic review technique was applied to locate the information of the articles and patent applications published in the period 2012-2022; coupled with the Content Analysis technique to process and analyze the information; as well as bibliometrics to obtain the main trends in the area. Among the most important challenges presented by these technologies is that most require high energy consumption and some only process homogeneous waste.

Keywords: Fuel production, plastic waste, waste recycling, conversion processes, trends.

UNESCO Code: 3308.04 Pollution engineering. CAPE Code: 306010002 – Chemical engineering industrial processes

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

Gloria María Aponte Figueroa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1029-8264> . correo: gapontef@ucab.edu.ve. Ingeniero Químico, Magister en Sistemas de Información. Especialista en Sistemas de Información, Doctora en Gestión de Investigación y Desarrollo. Profesora Investigadora en el Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Facultad de Ingeniería en la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.

1. Introducción

La dependencia de los plásticos sintéticos aumenta cada año debido a la alta demanda que presentan estos productos en el mercado, por sus características distintivas como su alta durabilidad, no toxicidad, baja densidad, no conductividad, buena resistencia mecánica o muy alta resistencia a la corrosión y al ácido; son químicamente estables y versátiles; haciéndolos ideales para electrodomésticos, aplicaciones automotrices y de construcción, fabricación de equipos médicos y uso hortícola, entre otros [1]. Por su alta utilidad, la producción de los plásticos en el mundo es cada vez mayor. De acuerdo con las últimas estadísticas publicadas la producción de plásticos en el mundo alcanzó 390,7 millones de toneladas métricas, en el año 2021 y se espera que esta cifra aumente hasta 1231 millones de toneladas para el 2060 [2]. De este total el 90,2% son producidos a partir de materias primas de combustibles fósiles. Los plásticos reciclados y los biobasados representan, apenas, el 8,3% y 1,5% respectivamente del total producido. Según las predicciones del Foro Económico Mundial para el 2050 los océanos tendrán más desechos plásticos que peces [3]. Así mismo los países con mayor producción de plásticos son China (29%), seguido de la Unión Europea (19%) y Estados Unidos (18%) [4] y el crecimiento mayor de los desechos plásticos se presenta en países en desarrollo como los del continente africano y países emergentes como los asiáticos [2].

Los tipos de plásticos con mayor producción en el mundo son: polipropileno, polietileno de alta y baja densidad y cloruro de polivinilo, que representan un 47% del total de la producción mundial [4]. La mayor parte de la contaminación producto de los desechos plásticos proviene de los macroplásticos; no obstante, la fuga de los microplásticos (polímeros sintéticos de menos de 5 milímetros de diámetro) de artículos como gránulos de plástico industrial, textiles y desgaste de neumáticos también son un factor representativo en la contaminación [4]. Con la finalidad de reducir el impacto ambiental de los desechos plásticos, se utilizan distintos métodos de reciclaje para procesarlos; los cuales están enfocados en el reciclado mecánico, químico y la incineración. El reciclado mecánico consiste en la separación del plástico de manera individual para luego ser triturado, lavado, secado y templado [5]. Aunque, debido a las limitaciones relacionadas con el tipo de materia prima, solo entre el 15 y el 20 % del total de los desechos plásticos es reciclado por este método [6]. Por lo tanto, el reciclaje mecánico no es sostenible para gestionar la gran cantidad de residuos plásticos que se generan continuamente [6].

Otro de los métodos utilizados es el reciclado químico, que consiste en transformar la materia prima, en este caso desechos plásticos, en otros productos [7] mediante diferentes procesos como craqueo térmico, pirólisis, craqueo catalítico, hidrocrqueo, entre otros. Otra de las rutas para la gestión de residuos plásticos es la incineración, mediante la cual se descomponen por completo los desechos plásticos y se recupera energía térmica con una alta reducción de dichos desechos [7] [8]. Esta ruta presenta numerosos problemas de contaminación y salud asociados con la incineración de plásticos, incluida la liberación de gases tóxicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, dioxinas, y fosgeno) y polvo, que son perjudiciales para el ecosistema y suponen riesgos significativos para la salud humana [7].

En este trabajo se presenta un estudio sobre las principales tecnologías mediante reciclado químico para la conversión de los desechos plásticos en combustible. Para ello se analizaron los diferentes procesos que conforman el reciclado químico que permiten llevar a cabo la conversión de dichos desechos con la finalidad de obtener combustibles. También se presentan las principales tendencias que se visualizan en el mundo, mediante el análisis de la información publicada tanto en artículos de revistas y congresos especializados en el área, patentes de invención e información de mercado. A continuación se presenta la metodología que se utilizó para recuperar y analizar la información; así como las principales tecnologías que se utilizan para obtener combustibles a partir de desechos plásticos, las principales tendencias internacionales que se visualizan en los últimos diez años y finalmente las conclusiones a las cuales se llegó a la luz del análisis e interpretación de la información obtenida.

2. Desarrollo

2.1. Metodología

Para realizar este trabajo se llevó a cabo una investigación documental en el área de procesamiento de desechos plásticos para obtener combustibles mediante tecnologías de reciclado químico. Se realizó una búsqueda de información para recuperar la información relevante publicada en el período 2012 - 2022. Para ello se utilizó la base de datos Lens.org, que es una fuente de información multidisciplinaria que indiza tanto literatura abierta, como patentes de invención. Para la recuperación de los artículos se acotó la combinación de palabras clave en los campos: título (TI), resumen (AB), palabras clave (KW) y campo de estudio (SF). En el caso de los documentos de patentes se acotó a las solicitudes de patentes publicadas en el periodo de interés y a los campos de búsqueda: título (TI), resumen (AB) y reivindicaciones (CLMS) (ver figura 1). Una vez obtenida la información se seleccionaron los documentos relevantes y eliminaron los duplicados y luego, mediante un proceso no sistematizado de la información, se seleccionaron aquellos documentos cuyo contenido presentaban un panorama completo sobre las tecnologías y utilizando la técnica de Análisis de Contenido se procesó y analizó la información en función de las diferentes tecnologías y sus características más importantes. Para el caso de las tendencias se utilizó la herramienta “Analysis” de la base de datos Lens.org, que está disponible en línea en dicha base de datos y que permite procesar la información obtenida y obtener las diferentes tendencias en función de los parámetros que se deseen analizar. Una vez obtenidos los datos para el período en estudio se utilizó la técnica de Análisis Bibliométrico para realizar el estudio de las tendencias respectivas.



Figura 1. Estrategia de búsqueda utilizada.

2.2. Tecnologías de reciclado químico a escala comercial

Una de las alternativas tecnológicas que se utilizan para procesar los desechos plásticos y convertirlos en otros productos, de tal manera que se pueda establecer una especie de ciclo y se minimice o elimine la cantidad de desechos finales, es la vía del reciclado químico. Esta ruta tecnológica está conformada por varios tipos de tecnologías que son procesos que permiten descomponer los polímeros en sus componentes básicos, o la obtención de plástico reciclado con propiedades de plástico virgen que se pueden usar en aplicaciones tan exigentes, como envases para contener alimentos [4]. A continuación se presentan los procesos tecnológicos más importantes que existen para tratar los desechos de plásticos y convertirlos en otros productos. En este apartado se presentan las tecnologías de reciclado químico cuyo desarrollo se encuentra en escala comercial.

2.3. Pirolisis

La pirolisis es uno de los procesos ampliamente citados en la literatura como una de las tecnologías de reciclado químico. La pirolisis es una reacción de craqueo térmico en ausencia de oxígeno que rompe la

macroestructura del polímero y conduce a la formación de monómeros o productos de tipo combustible [9] [10]. Es una tecnología relativamente sencilla adecuada para reciclar residuos plásticos difíciles de despolimerizar. Los parámetros del proceso, como temperatura, presión y tiempo de residencia, afectan el producto final [11]. La temperatura es uno de los parámetros más importantes ya que controla la reacción de craqueo de la cadena polimérica e influye en la composición del producto. Las temperaturas mayores a 500°C producirían principalmente productos gaseosos o carbonizados, mientras que temperaturas entre 300-500°C dan origen a productos líquidos [12].

Entre las ventajas que presenta la pirolisis para tratar los desechos plásticos se encuentran: se obtiene un combustible de alto poder calorífico que puede ser utilizado en motores a gas para producir electricidad [8] es una tecnología en la que se pueden cambiar los parámetros del proceso para optimizar el rendimiento del producto de acuerdo con las preferencias y [11]. Es adecuada para tratar residuos plásticos difíciles de despolimerizar, como los envases de plástico multicapa [11] y para las mezclas de plásticos muy heterogéneas [10]. Por otra parte, no requiere una clasificación intensa de la materia prima [12]; el proceso se puede llevar a cabo con diferentes parámetros que dan como resultado distintos rendimientos y calidades del producto líquido [12] y produce menos contaminación ambiental comparada con la incineración y gasificación [1].

La pirolisis también presenta desventajas, entre las que se pueden mencionar: alto requerimiento energético; presenta baja tolerancia al polivinil cloruro ya que se pueden formar compuestos clorados en el producto de pirolisis; los productos, a menudo, necesitan una mejora antes de su uso posterior [11] requiere grandes volúmenes de procesamiento de materia prima para ser rentable [10] y las reacciones son muy complejas [11]; además exige temperaturas relativamente altas [13]. La pirolisis es una tecnología completamente desarrollada y comercialmente disponible con plantas operativas en distintos países, como por ejemplo: Estados Unidos, España, Japón, China y Alemania [11] [10].

2.4.Craqueo catalítico

Otra de las tecnologías de reciclado químico de interés es el craqueo catalítico. En este proceso se somete el desecho plástico al rompimiento de las moléculas en presencia de un catalizador, tales como los de zeolita y silico-alúmina; lo cual reduce la energía de activación del proceso e incrementa la velocidad de reacción. La adición del catalizador permite que el proceso ocurra a temperaturas más bajas, entre 300-350°C. Además, reduce la distribución de hidrocarburos en los productos finales, permitiendo obtener hidrocarburos líquidos con propiedades similares a los combustibles convencionales [14] [12] [11].

El craqueo catalítico genera mayores rendimientos en hidrocarburos en comparación con la pirolisis convencional para la mayoría de los plásticos, siempre que se seleccione el catalizador adecuado. Aunque, este proceso es sensible a la contaminación del plástico por la presencia de componentes de cloro y nitrógeno en la corriente de desechos plásticos que pueden desactivar el catalizador, y los materiales inorgánicos pueden bloquear los poros del catalizador [11]. En ese sentido, se requiere una etapa de pretratamiento con la finalidad de eliminar estos compuestos de la materia prima y así proteger al catalizador [10]. Este proceso fundamentalmente trabaja con polímeros puros del tipo de poliolefinas y poliestireno [9].

Entre las ventajas que presenta este proceso se encuentran: Las temperaturas de operación son más bajas; presenta mayores rendimientos del producto; tiempos de reacción más cortos; costo de producción y consumo de energía reducidos; productos con propiedades similares a los combustibles fósiles; el catalizador permite optimizar la distribución y selectividad del producto y posiblemente se obtienen conversiones del 100% de los residuos plásticos [11]; las condiciones de reacción menos estrictas favorecen la economía [10] y los resultados del proceso tienen una cantidad de impureza reducidas en hidrocarburos líquido y disminuye la producción de carbón [13].

En relación con las desventajas que presenta el craqueo catalítico es sensible a la contaminación de la materia prima; a menudo requiere pretratamiento; los componentes de nitrógeno y cloruro pueden desactivar el catalizador [11] y también existe una ausencia de tecnología de reactor adecuada; la presencia

de componentes inorgánicos puede bloquear los poros del catalizador [10]. Las instalaciones industriales de la tecnología de craqueo catalítico están disponibles en diferentes países; algunas están localizadas en Estados Unidos, Japón, India y Polonia, entre otros [11] [10].

2.5. Gasificación

Este proceso involucra la oxidación parcial de los desechos de plásticos en presencia de un agente oxidante, que puede ser una mezcla de vapor y oxígeno puro o simplemente aire [9] [10]. El proceso logra una descomposición de los polímeros y se obtiene una mezcla de hidrocarburos y gas de síntesis, que se puede utilizar para producir energía, hidrógeno o productos químicos y subproductos, como alquitranes y carbón [11]. La gasificación de los residuos plásticos suele producirse a temperaturas de 700-1.200 °C y depende del agente de oxidación, el cual determina la composición del gas de síntesis y, por tanto, sus aplicaciones. Debido al mayor contenido de alquitrán en el gas producido a partir de desechos plásticos, la eficiencia del proceso se reduce y el producto debe mejorarse antes de ser usado [11].

Entre las principales ventajas que presenta el proceso de gasificación se encuentran: el proceso permite un rompimiento minucioso de las moléculas de los polímeros; el gas obtenido puede tener múltiples aplicaciones; es apto para procesar residuos plásticos mixtos; la producción del gas de síntesis está libre de nitrógeno atmosférico mediante la gasificación con oxígeno puro y cuando se utiliza vapor permite su uso para aplicaciones de síntesis y producción de nuevos productos plásticos y también permite la posible producción de hidrógeno [11].

En relación a las desventajas, el gas de síntesis producido necesita mejoras adicionales antes de su uso; requiere de altos volúmenes de materia prima para ser factible; en el gas producido también hay alquitranes y carbón; requiere de altos costos y uso de energía [11]. Es sensible a algunos contaminantes, ya que pueden afectar los procesos posteriores; produce compuestos del tipo NO_x nocivos [10]. La gasificación también requiere altos costos operativos debido al pretratamiento de la alimentación, el consumo de oxígeno puro y los costos de limpieza del gas de síntesis [1]. La formación de alquitrán provoca graves problemas operativos que conducen a una reducción de la eficiencia general del proceso y de las aplicaciones del gas producido; por otra parte, se necesita un sistema de limpieza de gas muy eficiente para cumplir con los requisitos para la producción de compuestos químicos a partir de gas de síntesis [14]. Finalmente, se debe lograr una preparación cuidadosa de la materia prima mediante trituración, tamizado con un contenido de humedad controlado [1]. Entre las plantas comerciales en operación con el proceso de gasificación se encuentra Enerkem en Canadá que produce biometanol, etanol y etileno a partir de desechos plásticos [11].

2.6. Quimiólisis

Otro de los procesos que forman parte del reciclado químico es la quimiólisis, que consiste en descomponer los polímeros en monómeros, oligómeros u otras sustancias químicas que podrían usarse como materia prima para fabricar nuevos materiales y productos. Existen diferentes tipos de despolimerización química según el tipo de agente químico implicado: metanólisis, glucólisis, hidrólisis, alcoholólisis, aminólisis, etc. [10] [9]. Mediante la quimiólisis se pueden obtener monómeros que pueden ser purificados mediante filtración utilizando aditivos para producir material de calidad virgen [15]. Es así como la quimiólisis abre oportunidades para diferentes aplicaciones industriales donde los materiales puros son importantes, por ejemplo, materiales en contacto con alimentos. Esta tecnología solo se puede aplicar a polímeros de condensación como polietilentereftalato y poliamida [10] y es principalmente adecuada para residuos plásticos homogéneos [11].

Es importante tener presente que para obtener un flujo homogéneo con el proceso de quimiólisis, los residuos plásticos mixtos se pueden separar y clasificar según la forma, la densidad, el color, el tamaño o la composición química de los plásticos, lo que se puede hacer mediante varias técnicas, como flotación

(hundimiento-flotación), filtración por fusión, Fourier Transform Near Infrared (FT -NIR), separación de densidad magnética, separación triboeléctrica, flotación de espuma o detección de rayos X [10]. Se han identificado varios problemas en la quimiólisis, como la separación del agente de escisión líquido y otros subproductos, la recuperación de catalizadores disueltos y la pequeña área de contacto entre el agente de escisión y el polímero [15].

Las principales ventajas que presenta la quimiólisis es que se obtienen productos puros de valor agregado [10]; está integrado en las líneas de producción de polímeros; requiere menor aporte de energía que otros procesos de reciclaje químico establecidos, como la pirolisis y la gasificación [16]. Como desventajas, requiere de grandes volúmenes para ser rentable [10]; es principalmente adecuado para polímeros de condensación (PET, PU, PC) [16]; es apto solo para plásticos homogéneos [11]; los polímeros reciclados son más caros que los polímeros vírgenes [15] y es susceptible de procesar contaminantes como metales pesados [16].

La quimiólisis es un proceso disponible comercialmente; empresas como: DuPont/DOW, Goodyear, Shell Polyester, Zimmer, and Eastman Kodak [10]; así como Garbo, IBM, Ioniqa, and PerPETual [15] disponen de plantas comerciales en particular que utilizan la glicólisis. En el caso de la hidrólisis, está disponible comercialmente y en escala piloto en empresas como: Gr3n, Carbios y Aquafil. La metanolisis, las empresas Loop Industries e Eastman tienen una planta en fase de desarrollo [15].

2.7. Tecnologías de reciclado químico en escala piloto o laboratorio

Existen otros procesos de reciclado químico que se encuentran en etapa de desarrollo (en escala piloto o laboratorio); estos son: hidrocraqueo, pirolisis con reformado en línea, pirolisis asistida con microondas, pirolisis con plasma y gasificación con plasma. Se muestra a continuación las principales características de cada uno de dichos procesos.

- a. *Hidrocraqueo*: se alcanza mediante la adición de hidrogeno al proceso de pirolisis. Ocurre en un rango de temperatura entre 350-500°C y el hidrógeno se alimenta a una presión de alrededor de 70 atm. El proceso reduce la formación de aromáticos, olefinas y coque y la adición de hidrógeno ayuda a remover heteroátomos de bromo, cloro y fluor que pueden estar presentes en los desechos de plásticos [17], por lo que los productos resultantes de la pirolisis presentan una calidad mucho mayor [9] [10]. Adicionalmente, el hidrocraqueo puede manejar una mezcla de desechos plásticos [10]. Entre los principales desafíos para esta tecnología son los altos costos del hidrógeno, gastos de capital y operativos, que limitan el escalamiento a la operación industrial [10] [11]. Finalmente, el hidrocraqueo de algunos tipos de plástico (ejemplo, PVC) puede generar sustancias peligrosas que requerirían costos adicionales para controlar y eliminar del producto final [11]. La aplicación del hidrocraqueo en el caso de desechos plásticos es aun limitada y solo se realiza a escala piloto [11].
- b. *Pirolisis con reformación en línea*: se desarrolló para optimizar la producción de hidrógeno libre de alquitrán a partir de residuos plásticos, que suele alcanzar más del 30 % [11] El proceso implica la pirolisis de residuos plásticos en el primer reactor y el reformado del producto de pirolisis en el siguiente. El proceso ocurre a temperaturas más bajas (500-900°C) en comparación con la gasificación, lo que disminuye el costo de producción [14]; por otra parte, la ausencia de contacto entre las impurezas en los desechos plásticos y el catalizador, minimiza los costos de los catalizadores necesarios para el paso de reformado [18]. La principal desventaja de esta tecnología es que se encuentra en etapa de desarrollo [11]. No obstante, [19] estimaron que este proceso puede ser económicamente factible y reconocieron la alta flexibilidad del proceso para reciclar diferentes tipos de plásticos, así como su alta eficiencia de conversión y producción de hidrógeno.
- c. *Pirolisis asistida con microondas*: este proceso implica la adición de material dieléctrico o absorbente como carbón activado, dióxido de silicio o grafeno a los desechos plásticos [20]. Durante el proceso se absorbe la energía de las microondas para crear la energía térmica adecuada para alcanzar las

temperaturas necesarias para que se produzca la pirolisis [21]. La irradiación de microondas puede descomponer los hidrocarburos más pesados de los desechos plásticos en hidrocarburos más livianos, produciendo petróleo o gas de síntesis de alta calidad [20].

Mediante este proceso se logra una distribución uniforme del calor, mejor control sobre el proceso, mayores tasas de calentamiento y de velocidad de producción [11]. Entre las limitaciones del proceso se incluyen mediciones imprecisas de temperatura, la dificultad de dispersar las microondas adecuadamente, se requieren grandes volúmenes de materia prima, falta de conocimiento sobre las funciones del material dieléctrico en la eficiencia del calentamiento y eficiencia del microondas [21] [11]. Como resultado, esta tecnología se ha desarrollado solo a escala de laboratorio y piloto, y la ausencia de una metodología robusta para escalar el proceso dificulta su potencial de aplicación [22].

- d. *La pirolisis con plasma:* integra las propiedades termoquímicas del plasma en la pirolisis convencional para descomponer por completo los monómeros de desechos plásticos y producir gas de síntesis, compuesto principalmente de CO, H₂ y pequeñas cantidades de hidrocarburos superiores. El proceso es muy rápido (0,01 y 0,5 seg) y tiene lugar a temperaturas que oscilan entre 1730 y 9730°C [11]. Se logran altos rendimientos de gas debido a las altas temperaturas del proceso, que promueven el craqueo casi completo del alquitrán [14]. Además, el proceso es capaz de producir una alta recuperación de monómeros debido al calentamiento y la ionización eficientes de las cadenas de polímeros [15]. Además, las altas temperaturas pueden descomponer los compuestos tóxicos que pueden estar presentes en el gas y evitar la formación de ácido clorhídrico. Como desventaja, esta tecnología se ha aplicado mayoritariamente para la destrucción de residuos peligrosos; por otra parte, aunque las emisiones del proceso son bajas, el proceso tiene altos requerimientos de energía. La investigación y desarrollo de esta tecnología se encuentra a escala de laboratorio [11].
- e. *La gasificación con plasma:* es un proceso alotérmico en el que el calor se produce mediante plasma térmico, usualmente generado por sopletes con plasma de arco no transferido de corriente continua [20]. Las temperaturas del proceso pueden ser muy altas y alcanzar los 14.000°C. Los parámetros operativos, como la temperatura de reacción, el tiempo de residencia, y las velocidades de flujo de las corrientes de oxidante, gas de plasma y vapor, afectan el proceso de gasificación por plasma [17]. El proceso puede manejar todo tipo de desechos plásticos, tiene una alta tolerancia a la materia prima de baja calidad y da como resultado gas de síntesis de alta pureza con bajo contenido de alquitrán [11]. Todavía existen algunos desafíos en la transferencia de esta tecnología a escala industrial, como las inversiones y elevados costos operativos, la alta intensidad energética, requiere de sistemas de clasificación de residuos adecuados y la comprensión limitada del proceso [17]. Esta tecnología se considera emergente para el caso de reciclaje de plásticos [11].

2.8.Últimos avances tecnológicos publicadas en solicitudes de patentes durante el 2022-2023

Los últimos avances tecnológicos publicados que han sido protegidos mediante solicitudes de patentes en tecnologías relacionadas con reciclado químico para tratar desechos plásticos con la finalidad de obtener combustibles, se muestran en el Cuadro 1. Se observa que dichos procesos representan mejoras de los procesos convencionales; es importante resaltar que casi todas las solicitudes de patentes son internacionales lo cual es un indicador de la relevancia tecnológica que presenta cada tecnología con alto potencial de comercialización.

Cuadro 1. Tecnologías de reciclado químico sobre desechos plásticos para obtener combustibles. Solicitudes de patentes año 2022.

Tecnología	Características relevantes	Organización /País	Referencia
Proceso hidrotérmico con separación continua	No requiere procesos adicionales de mejora, ni catalizadores; se producen pocos hidrocarburos poliaromáticos o carbón vegetal (<1%). En condiciones de conversión preferidas, el 13 % en peso de las poliolefinas se convierte en gases (principalmente C3) y el 87 % en peso se convierte en aceites con distribuciones de número de carbono en el rango de gasolina y diésel (C4 a C25).	Purdue Research Foundation/ Estados Unidos	[23]
Craqueo térmico	Utiliza cera(s) de alto peso molecular (C30-C100) como agente de transferencia que se mezcla con los desechos de plásticos antes de iniciar el proceso de craqueo. El uso de este tipo de ceras permite mantener la cantidad de desechos de plásticos relativamente más baja en comparación con el uso de aceites pesados; ello ayuda a mejorar la eficiencia de la planta y se reduce el consume de energía.	Gupta Kamlesh Madanlal, Gupta Kavita Madanlal./ India	[24]
Equipo de recolección y procesamiento de desechos plásticos <i>in situ</i> de la superficie de mares y ríos)	Los desechos plásticos se recogen de la superficie del agua, se transportan y se procesan en la embarcación. Se aplica un proceso de desalinización y/o deshumidificación de los desechos plásticos, luego se despolimerizan en el recipiente sin acceso de aire y los vapores (gases) resultantes se destilan, por lo cual al menos una fracción se separa y posteriormente se purifica mediante hidrogenación. Finalmente se proporciona como combustible para otros buques o se vende como un producto petroquímico semiacabado.	Fives a S/ Eslovaquia	[25]
Craqueo térmico	Se mezclan hidrocarburos de bajo peso molecular, que actúan como "reactivos de solución", con hidrocarburos de alto peso molecular (desechos plásticos, hidrocarburos de alto punto de ebullición y mezclas de ambos). Dicho reactivo ayuda a reducir la viscosidad del material para una transferencia de calor más efectiva. Dicha mezcla se calienta y se separan los contaminantes livianos de los pesados de antes de realizar la termólisis. Seguidamente se lleva a cabo la termólisis a una temperatura entre 350-425°C y una presión de 3-20 bar por un tiempo entre 1-4 horas.	Resonante Llc/ Estados Unidos	[26]
Tratamiento hidrotérmico y craqueo con vapor de residuos plásticos para obtener hidrocarburos y coque.	Los desechos plásticos son sometidos al proceso de conversión térmica que se lleva a cabo mediante el proceso hidrotérmico en presencia de una solución acuosa a presiones y temperaturas supercríticas y luego se someten al craqueo con vapor y luego los productos se pasan por un coquificador para obtener los combustibles y el coque residual.	Liss Barry/ Estados Unidos	[28]

Cuadro 1. (Continuación). Tecnologías de reciclado químico sobre desechos plásticos para obtener combustibles. Solicitudes de patentes año 2022.

Tecnología	Características relevantes	Organización/ País	Referencia
Método para mejorar la calidad y estabilidad de combustibles obtenidos a partir de residuos plásticos mediante pirolisis	Los combustibles obtenidos a partir de la pirolisis son tratados mediante una etapa de adsorción, destilación en fase líquida, hidrot ratamiento y por último la estabilización del combustible pirolizado. En la etapa de adsorción se pueden utilizar compuestos de: cloruro, ácido carboxílico, azufre, metales, compuestos nitrogenados, carbón activado y arcilladas activada. El hidrot ratamiento se lleva a cabo en presencia de hidrógeno y un catalizador sólido formado por un metal soportado en una matriz de compuestos de silicona.	Neoliquid Advanced Biofuels and Biochemicals S L/España	[29]
Producción de diesel con grado ultra bajo de azufre mediante pirolisis de plásticos de desecho mixtos	El producto pirolizado se somete a una operación condensación fraccionado en tres pasos para obtener una fracción de combustible pesado, medio y liviano y estas se introducen a una sección de hidromejoramiento para obtener un diésel con propiedades muy parecidas a un diésel comercial.	Clean Planet Energy a Trading Name of Pyroplast Energy Ltd/ Reino Unido	[30]

2.9.Principales tendencias

La tendencia creciente acelerada de las publicaciones y las solicitudes de patentes en el mundo relacionadas con los procesos de reciclaje químico aplicado a los desechos plásticos para producir combustibles (ver Figura 1 y 2), reflejan que la comunidad científica internacional está dedicando esfuerzo e interés en esta línea de investigación realizando actividades de investigación, desarrollo e innovación que permitan diseñar y mejorar tecnologías que ayuden a procesar de manera óptima los desechos plásticos que se producen en el mundo con la finalidad de producir combustibles. Ello representa una alternativa de solución al problema de contaminación ambiental que constituyen los desechos plásticos.

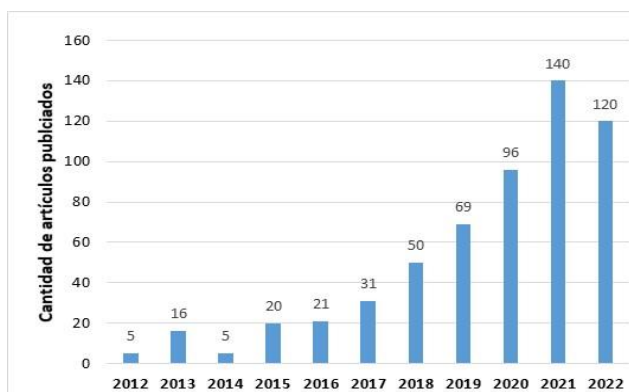


Figura 1. Evolución de los artículos publicados



Figura 2. Evolución de las solicitudes de patentes

En cuanto a los artículos publicados, los países del continente asiático tienen una alta representación, liderado por la India (ver Figura 3); mientras que en el caso de las solicitudes de patentes, Estados Unidos es el principal exponente, seguido por China (ver Figura 4). También es importante resaltar que el 28% de las solicitudes de patentes realizadas en el periodo estudiado son internacionales, lo que permite aplicar una estrategia de protección amplia en cuanto a la cobertura por países y al mismo tiempo refleja la importancia y relevancia estratégica de las tecnologías divulgadas en dichas solicitudes.

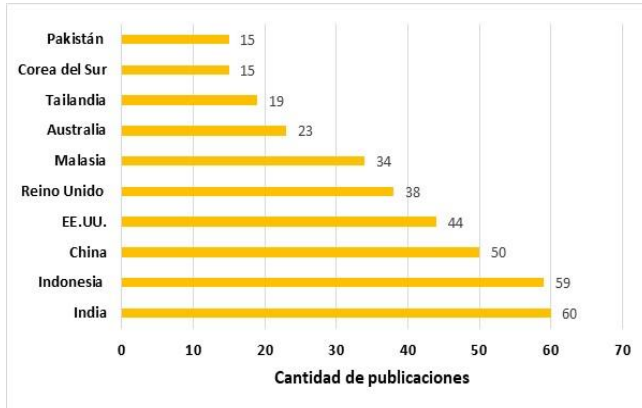
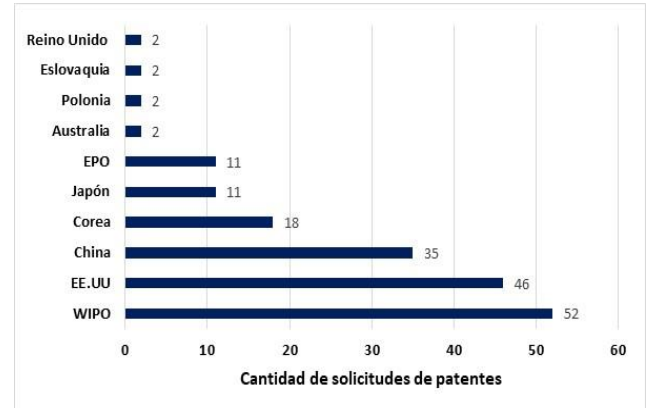


Figura 3. Principales países con artículos publicados.



WIPO: World International Property Organization; EPO: European Patent Office.

Figura 4. Principales países con solicitudes de patentes.

También se observa que los investigadores pertenecientes a la comunidad académica internacional publican sus investigaciones principalmente en artículos de revistas y congresos (ver Figura 5); mientras que las investigaciones pertenecientes al mundo empresarial son principalmente divulgadas mediante solicitudes de patentes de invención con la finalidad de obtener la protección intelectual en las tecnologías respectivas (ver Figura 6).

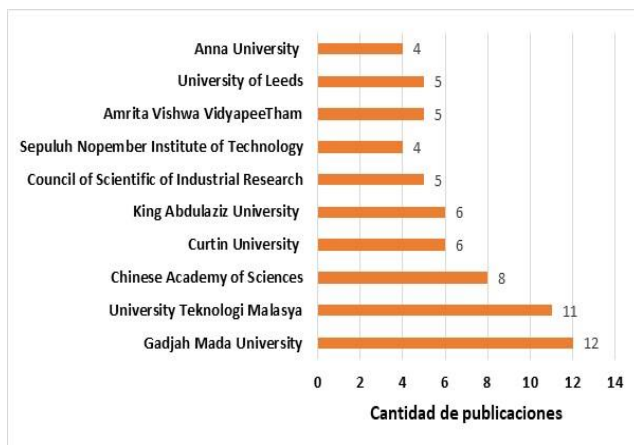


Figura 5. Principales organizaciones.

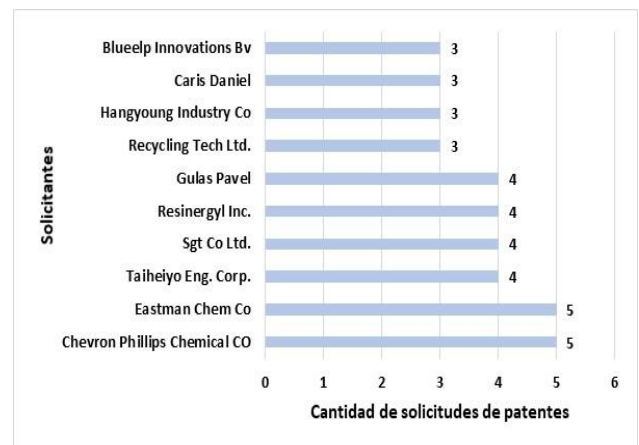


Figura 6. Principales solicitantes.

Con respecto a las solicitudes de patentes más citadas en el área de estudio se observa que la tecnología protegida mediante la patente US9200207B2, otorgada en Estados Unidos en el año 2015 a la University of Central Florida Research Foundation Inc., ha sido la más citada con una total de 43 citas, lo cual es un indicador de la importancia que representa dicha tecnología en el área de interés (ver Cuadro 2). Dicha

tecnología está relacionada con un método para producir combustibles líquidos a partir de una mezcla de desechos plásticos con un hidruro metálico en presencia de un catalizador de metal soportado en condiciones de pirolisis; la temperatura y presión de operación del proceso se encuentra en el rango entre 300 y 800 °C y entre 1 a 20 atmósferas [31]. Otro aspecto relevante, es que de las cinco patentes más citadas, tres de ellas son tecnologías desarrolladas por organizaciones localizadas en Estados Unidos.

Cuadro 2. Solicitudes de patentes con mayor cantidad de citas.

Título de la patente	Número de la patente	Solicitante	Mercados protegidos mediante la patente	Cantidad de citas
Métodos para producir combustibles líquidos a partir de desechos plásticos	US2012/0310023 A1	University of Central Florida Research Foundation Inc	Estados Unidos	43
Planta y proceso para pirolizar una mezcla de desechos plásticos	WO2018/000050 A1	Future Energy Invest Pty Ltd	Unión Europea, México, Singapur, Japón, Israel, Brasil, China, Corea del Sur, Canadá, Australia	20
Pirolisis catalítica de biomasa sólida	US2013/0023706 A1	University of Massachusetts	Nueva Zelanda, España, Estados Unidos, Israel, Australia, Brasil, China, Japón, Canadá, México.	18
Sistema y catalizador para producir combustible a partir de material de desechos	US2013/0136665 A1	Enfc Co. Ltd ; Oil City Co. Ltd	Italia, China, Corea del Sur, Brasil y Estados Unidos.	13
Método y aparato para producir combustible a partir de materiales de desechos	KR 20140098352 A	Sung an Ent Co Ltd , Daebo Engineering & Construction Co Ltd	Corea del Sur	11

En cuanto a los artículos más relevantes, se observa que el relacionado con la producción de combustible a partir de desechos plásticos municipales mediante un proceso de pirolisis en secuencia con una reformación catalítica es el más citado con 219 citas (ver Cuadro 3). Este trabajo es producto de una actividad de investigación conjunta entre investigadores procedentes de las instituciones: Tokyo Institute of Technology, Gadjah Mada University y Universiti Sains Malaysia Engineering Campus; instituciones de Japón, Indonesia y Malasia respectivamente.

En relación a la disponibilidad comercial de las tecnologías relacionadas con reciclaje químico se puede observar que la mayoría de las tecnologías están disponibles comercialmente; excepto cuatro de ellas (ver Cuadro 4).

Algunos de los aspectos relevantes que se pueden resaltar de las tecnologías comerciales expuestas en el Cuadro 4 se encuentran: El craqueo catalítico presenta ventajas con respecto a la pirolisis convencional, ya que requiere menor temperatura de operación y menos energía, lo cual reduce los costos operativos y se obtiene un producto de mejor calidad, distribución y selectividad y con menos carbón e impurezas. Por otra parte, el craqueo catalítico presenta algunas desventajas como mayor sensibilidad a las impurezas y la contaminación, lo que incide en la desactivación del catalizador. Asimismo, en relación a la gasificación se pueden procesar desechos plásticos mixtos y ofrecer una gran descomposición de polímeros, pero requiere altos niveles de energía y costos, y de grandes volúmenes de desechos para ser factible. Con respecto a la quimiólisis puede producir polímeros vírgenes, pero el proceso requiere de grandes volúmenes para ser económicamente viable, solo puede aceptar flujos de residuos homogéneos y es principalmente adecuado para polímeros de condensación como el polietileno, para el cual ya existen plantas operativas [32].

Cuadro 3. Artículos más citados.

Título del artículo	Autores	Organización/país	Cantidad de citas/ año de publicación
Producción de combustible a partir de desechos plásticos municipales mediante un proceso de pirólisis en secuencia con una reformación catalítica	Mochamad Syamsiro, Harwin Saptoadi, Tinton Norsujianto, Putri Noviasri, Shuo Cheng, Zainal Alimuddin, Kunio Yoshikawa	Tokyo Institute of Technology; Gadjah Mada University; Universiti Sains Malaysia Engineering Campus/Japón; Indonesia; Malasia	219/2014
Análisis de combustión, rendimiento y emisiones de un motor diésel utilizando un combustible proveniente de una pirólisis de desechos plásticos	Ioannis Kalargaris, Guohong Tian, Sai Gu	University of Surrey/Reino Unido	173/2017
Degradación eficiente y selectiva de polietilenos en combustibles líquidos y ceras en condiciones moderadas	Xiangqing Jia, Chuan Qin, Tobias Friedberger, Zhibin Guan, Zheng Huang	Chinese Academy of Sciences; University of California/China; EE.UU	173/2016
Fotoreformado de residuos plásticos no reciclables sobre un catalizador de nitruro de carbono/fosforo de níquel	Taylor Uekert, Hatice Kasap, Erwin Reisner	University of Cambridge/Reino Unido	163/2019
Cinética de efectos sinérgicos en co-pirólisis de biomasa con residuos plásticos.	K G Burra, Ashwani K Gupta	University of Maryland/EE.UU	142/2018

Cuadro 4. Disponibilidad comercial de las tecnologías de reciclado químico.

Tecnología	Escala de operación	Materias primas
Pirólisis convencional Craqueo térmico	Comercial	Polietileno de alta densidad y baja densidad, polipropileno, poliestireno, mezclas de los mismos; composites de fibras reforzadas y empaques plásticos multicapas, polimetilmetacrilato, poliestireno de alto impacto, acrilonitrilo butadieno estireno, poliuretano.
Craqueo catalítico	Comercial	Polietileno de alta y baja densidad, polipropileno, y poliestireno.
Gasificación convencional	Comercial	Todos los tipos de plásticos y mezclas de los mismos.
Quimiólisis	Comercial	Polietilentereftalato, poliuretano, policarbonatos, poliamida, ácido poliláctico, y ácido poliláctico .
Hidrocraqueo	Piloto	Todos los tipos de plásticos y mezclas de los mismos.
Pirólisis con reformación en línea	Piloto	Polietileno, polipropileno, poliestireno y sus mezclas.
Plasma pirólisis	Laboratorio	Mezclas de plásticos.
Pirólisis asistida con microondas	Laboratorio	Desechos de plásticos y mezclas de poliestireno y polipropileno.
Gasificación con plasma	Comercial pero solo aplicada a la descomposición de desechos peligrosos.	Todos los tipos de plásticos y mezclas de los mismos.

Fuente: [32].

Con respecto al hidro craqueo presenta ventajas como la eliminación de cloro o bromo que se puede encontrar en algunos tipos de plásticos, y también evita la producción de compuestos tóxicos. Además, representa una mejor opción de tratamiento que la pirolisis, ya que opera a temperaturas más bajas y genera un producto de alta calidad, que no requiere un tratamiento posterior. Los costos de inversión, operativos y de hidrógeno son altos, lo que probablemente sea la razón por la cual esta tecnología no alcanza niveles comerciales de [32].

En relación a la pirolisis asistida por microondas tiene algunas ventajas con respecto a la pirolisis convencional, tales como mayores velocidades de calentamiento, más control sobre el proceso y tiempo de producción más corto; También presenta varias desventajas relacionadas con la alta sensibilidad a las grandes fluctuaciones en la composición de los residuos, requiere de grandes volúmenes de materia prima y las mediciones de temperatura son imprecisas [11]. Por otra parte, no hay uniformidad en el proceso de calentamiento y existe dificultad para dispersar adecuadamente las microondas y también hay limitaciones sobre el conocimiento de las funciones de los materiales dieléctricos en la calefacción [21].

En cuanto a las tecnologías de plasma tienen varias ventajas frente a los procesos convencionales; sin embargo, los requisitos de energía muy altos hacen que la pirolisis y la gasificación de plasma sean muy costosas. Finalmente, la pirolisis con reformado en línea parece ser la tecnología que tiene un alto potencial ya que sus limitaciones están relacionadas con la falta de investigación sobre el rendimiento del catalizador y la falta de aplicación industrial [32].

3. Conclusiones

Las tecnologías de reciclado químico representan una alternativa para procesar los desechos plásticos que se producen en el mundo y que cada día contribuyen con agravar la contaminación ambiental; algunas de estas tecnologías se encuentran disponibles comercialmente como es el caso de la pirolisis, craqueo térmico y catalítico, gasificación y quimiolisis. Mientras que el hidro craqueo, la pirolisis asistida con microondas, la pirolisis con reformado en línea, así como la pirolisis con plasma y la gasificación con plasma se encuentran en etapa de laboratorio y banco piloto.

Entre los principales desafíos que presentan las tecnologías de reciclado químico que están comercializadas es que requieren de gran cantidad de materia prima para que puedan ser rentables y altos requerimiento de energía (pirolisis, gasificación); por otra parte, algunas procesan solo desechos plásticos homogéneos (quimiolisis), el craqueo catalítico requiere de un pretratamiento de la materia prima para eliminar las impurezas que puedan taponar el catalizador y en el caso de la pirolisis es necesario someter a los productos obtenidos a un tratamiento, antes de ser utilizados, para eliminar los productos clorados formados. Con respecto a las tecnologías en etapa de laboratorio y banco piloto, los esfuerzos de investigación están centrados en mejorar la tecnología con la finalidad de reducir los requerimientos de energía y los costos de operación.

La tendencia de las publicaciones y las solicitudes de patentes en el periodo 2011-2022 es creciente acelerada, lo que representa el interés y esfuerzo que está dedicando la comunidad científica y académica en el mundo en realizar actividades de investigación y desarrollo que le permita lograr nuevos avances tecnológicos o mejoras de los mismos con la finalidad de vencer los desafíos tecnológicos que presentan las tecnologías de reciclado químico para procesar los desechos de los plásticos para obtener combustibles y otros productos. Estados Unidos y China son los países líderes en cuanto a desarrollos tecnológicos, mientras que las investigaciones académicas están concentradas en los países del continente asiático como: India, Indonesia y China.

Referencias

- [1] S.M. Al-Salem. “Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC)”. *Process Safety and Environmental Protection*. vol 127, pp.171-179. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.008>
- [2] OECD. “Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060”. OECD. 2022. <https://www.oecd.org/environment/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.htm>
- [3] World Economic Forum. “The New Plastics Economy Rethinking the future of plastics”. WEF. 2016. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf? ga=2.38297635.1061183472.1676482661-2122784492.1676482661
- [4] Plastics Europe. “Chemical recycling”. Plastics Europe. 2022. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/chemical-recycling/>.
- [5] L. Rigamonti, M. Grosso, J. Møller, V. Martinez Sanchez, S. Magnani y T.H. Christensen. “Environmental evaluation of plastic waste management scenarios”. *Resources, Conservation and Recycling*. vol 85, pp. 42-53. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.012>
- [6] S.M. Al-Salem, S. Evangelisti y P. Lettieri. “Life cycle assessment of alternative technologies for municipal solid waste and plastic solid waste management in the Greater London area”. *Chemical Engineering Journal*. vol 244, pp. 391-402. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.066>
- [7] A. Ahamed, A.Veksha, K. Yin, P. Weerachanchai, A. Giannis y G. Lisak. “Environmental impact assessment of converting flexible packaging plastic waste to pyrolysis oil and multi-walled carbon nanotubes”. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 390, 15, pp.121449. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121449>
- [8] A. Antelava, S. Damilos, S. Hafeez, G. Manos, S. M. Al-Salem, B. K. Sharma, K. Kohli y A. Constantinou. “Plastic Solid Waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and Sustainable Management”. *Environmental Management*. 64, pp.230–244. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01178-3>
- [9] J. Datta y P. Koczyńska. “From polymer waste to potential main industrial products: Actual state of recycling and recovering”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* . vol 46, 10. pp. 905-946. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1180227>
- [10] K. Ragaert, L. Delva. y K. Van Geem. “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste”. *Waste Management*, vol 69, pp. 24-58. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [11] M. Solis y S. Silveira. “Technologies for chemical recycling of household plastics—A technical review and TRL assessment”. *Waste Management*, 105, pp: 128-138. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>
- [12] S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. W., Daud, y M. K. Aroua A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, pp:308-326. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- [13] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, y A. S. Nizami. “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review”. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, pp: 822-838. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- [14] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao, y M. Olazar. “Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp: 346-368. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142>
- [15] I. Vollmer, M.J. Jenks, M.C. Roelands, R.J. White, T. Van Harmelen, P. De Wild, G.P. Van Der Laan, F. Meirer, J.T. Keurentjes y B.M. Weckhuysen. “Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste”. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), pp: 15402-15423. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- [16] A. Lee, y M. S. Liew. “Tertiary recycling of plastics waste: an analysis of feedstock, chemical and biological degradation methods”. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-12. 2020. DOI:10.1007/s10163-020-01106-2

- [17] D. Munir, M. F. Irfan, y M. R. Usman. "Hydrocracking of virgin and waste plastics: A detailed review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, pp:490-515. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.034>
- [18] I. Barbarias, G. Lopez, M. Artetxe, A. Arregi, L. Santamaria, J. Bilbao, y M. Olazar "Pyrolysis and in-line catalytic steam reforming of polystyrene through a two-step reaction system". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 122, pp:502-510. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.006>
- [19] I. Barbarias, G. Lopez, M. Artetxe, A. Arregi, J. Bilbao, y M. Olazar. "Valorisation of different waste plastics by pyrolysis and in-line catalytic steam reforming for hydrogen production". *Energy Conversion and Management*, 156, pp: 575-584. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.048>
- [20] M. B. Al Rayaán. "Recent advancements of thermochemical conversion of plastic waste to biofuel-A review". *Cleaner Engineering and Technology*, 100062.2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100062>
- [21] H. Arshad, S. A. Sulaiman, Z. Hussain, Y. Naz, y F. Basrawi. "Microwave-assisted pyrolysis of plastic waste for production of fuels: a review". In *MATEC Web of conferences*. vol. 131, p. 02005. EDP Sciences. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713102005>
- [22] K. N. Aishwarya, y N. Sindhu. "Microwave assisted pyrolysis of plastic waste". *Procedia Technology*, 25, pp: 990-997. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.197>
- [23] W. Nien-Hwa, J. Kai, G. Clayton y X. Yang. "Integrated continuous conversion and separation methods for upcycling mixed plastic waste to clean gasoline and diesel fuels and other products". WO Patent 2022011241A1, January 13, 2022.
- [24] G. Kamlesh Madanlal; G. Kavita Madanlal. "An improved process for conversion of plastic waste to fuel". WO Patent 2022123351A1, June 16, 2022.
- [25] V. Daniška, T. Daniška. "Method of processing plastic waste from the water surface especially at sea, a system for its realization". WO Patent 2022238954A1, November 17, 2022.
- [26] J.W. Hemmings. "Process for production of useful hydrocarbon materials from plastic". US Patent 2022389328A1, December 08, 2022.
- [27] B. Boghosian. "Catalytic production of diesel-like oils from plastic waste". WO Patente 2022067067A1, March 31, 2022.
- [28] L. Barry. "Multi-step process for conversion of waste plastics to hydrocarbon". US Patent, 2022259502A1, August 18, 2022.
- [29] J.P. Gómez Martín y S. Sedano Santamaría. "Method for improving quality and stability of pyrolysis oils obtained from waste". EP Patent, 4108737A1, December 28, 2022.
- [30] A. Odjo, B. Stephens. "Commercial grade ultra-low sulphur diesel production process from mixed waste plastics pyrolysis oil". WO Patent, 2022034287A1, February 17, 2022.
- [31] C. Huang, A. Gujar, y M. Rodgers. "Methods of producing liquid hydrocarbon fuels from solid plastic wastes". US Patent 9200207B2, December 1, 2015.
- [32] The European Chemicals Agency. "Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy".2022. https://echa.europa.eu/documents/10162/1459379/chem_recycling_final_report_en.pdf/887c4182-8327-e197-0bc4-17a5d608de6e

Como citar este artículo:

G.M. Aponte Figueroa. "Producción de combustibles a partir de desechos plásticos mediante procesos de reciclado químico". *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol.17, no 1, pp. 32-46, 2023. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

Fuente de financiamiento:

La autora declara que la ejecución de la investigación y del presente artículo fue realizada sin recibir financiamiento alguno.