

Mejía, Santiago, Upegui, Sergio (2021). La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. Cuaderno Activa, 13, 41-60.



La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión

Pyrolysis and other methods of using tyre waste as an energy source for industry. A review

Santiago Andrés Mejía Madrigal¹, Sergio Augusto Upegui Sosa²

Recibido: 30 julio 2021. **Aprobado:** 30 marzo 2021.

Resumen: El continuo crecimiento del parque automotor en el mundo genera una constante producción de neumáticos de desecho en altos volúmenes, que representan una problemática para su adecuada disposición final o aprovechamiento. El objetivo de este artículo de revisión se concentró en identificar las principales técnicas de aprovechamiento para este tipo de residuos a partir de su aporte energético y potencial uso en la industria, se hizo particular énfasis en la técnica de pirólisis, comparando diferentes tipos de reactores y evaluando los rendimientos energéticos encontrados en la producción de aceite pirolítico. De esta forma, se identificaron técnicas adicionales con alta importancia actual a nivel internacional que podrían ser implementadas en un país como Colombia. Las técnicas de pirólisis de lecho fijo y cama fluidizada son las más

estudiadas, y han mostrado resultados entre el 55 y 60 % de rendimiento con temperaturas óptimas de calentamiento entre 450 y 550 °C. También es importante resaltar aquellos parámetros que influyen en el rendimiento final del aceite, los cuales, de acuerdo con la información recolectada, son: tamaños de partícula pequeños, tiempos de calentamiento cortos (de hasta 5 segundos) y composición de la materia prima, ya que, por ser productos con mayor porcentaje (alrededor del 30 %) de caucho natural, es posible obtener un producto de gran calidad con un poder calorífico de hasta 40 MJ/kg, el cual es comparable con combustibles como el biodiésel, keroseno, *fuel oil* ligero, entre otros, para ser usado como fuente de energía. Por todo ello se encuentra en la pirólisis una estrategia viable de aprovechamiento energético para los residuos de neumáticos.

1 Santiago Andres Mejia Madrigal título: Ing.Ambiental. Filiación institucional: Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: santiago_mejia111@hotmail.com ORCID: N/A

2 Ing. Ambiental, Ms. C. Ing. Urbana. Filiación institucional: Grupo de Investigación GITIMA, Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. ORCID: 0000-0003-4261-5241

Palabras clave: Neumáticos de desecho, elastómeros, pirólisis, aceite pirolítico, aprovechamiento energético.

Abstract: The continuous growth of the automotive fleet worldwide generates a constant production of waste tires in high volumes, which represent a problem for their proper final disposal or use. The aim of this review was to identify the main advantage techniques for this type of waste, based on its energy contribution and potential use in industry, making a special highlight on the pyrolysis technique, comparing different types of reactors and evaluating the energy yields found in the generation of pyrolytic oil. In this way additional techniques with high current international importance were identified that could be implemented in a country like Colombia. Fixed bed and fluidized bed pyrolysis techniques are the most studied, which have shown results between 55 % and 60 % of efficiency with optimal heating temperatures between 450 °C and 550 °C respectively. It is also important to highlight that those parameters related with the final performance of the oil, which, according to the information collected, are: small particle sizes, short heating times (up to 5 seconds) and the raw material composition, since they are products with a higher percentage (around 30 %) of natural rubber, it is possible to obtain a higher quality product with a calorific value of up to 40MJ/kg, which is comparable to fuels such as biodiesel, kerosene, light fuel oil, and others, allowing to be used as an energy source. These reasons make the pyrolysis as a viable strategy for the energetic use of tyre waste.

Keywords: Tyre waste, elastomers, pyrolysis, pyrolytic oil, energy use.

Introducción

Los neumáticos son uno de los residuos que más se generan por el crecimiento continuo del parque automotor a nivel mundial, y que no solo se genera en altos volúmenes, sino que constantemente se evidencia la problemática que representan asociada a su adecuada disposición

final o aprovechamiento. Se trata de un residuo no biodegradable, que en su mayoría es enviado a los rellenos sanitarios, sin embargo, actualmente existen diversas aplicaciones que se le pueden dar a este tipo de residuos con diferentes fines de aprovechamiento [1].

“Neumáticos al final de su vida útil” (ELT, por sus siglas en inglés) o llantas de desecho son términos comunes dados a las llantas desgastadas, que no se pueden reutilizar en vehículos para el tráfico público, incluso después de recauchutar y reenganchar. Su eliminación o utilización adecuadas es un problema crónico para el medio ambiente y la salud humana, especialmente en países en desarrollo como China e India, ya que el caucho del neumático contiene (entre otros productos) estireno, un componente fuertemente tóxico y, por lo tanto, altamente perjudicial para los humanos [2]. Estos países están experimentando un crecimiento económico y poblacional robusto, lo que finalmente resulta en un aumento en el número de vehículos en las carreteras [3].

Se estima que en todo el mundo se produjeron en 2017 alrededor de 2,7 billones de residuos de llantas de automóviles, y alrededor de 1 billón de unidades fueron eliminadas, de las cuales aproximadamente 290 millones eran de los EE. UU., y de estas más del 50 % corresponden a aquellas que fueron descartadas por medio de quema o en rellenos sanitarios, sin ningún tratamiento [4]. De acuerdo con la Agencia para la protección del ambiente (EPA, por sus siglas en inglés), la combustión de neumáticos emite aproximadamente un 6 % en masa de partículas sólidas y volátiles con respecto a la masa de combustible quemado [5]. Además, se estima que la producción del parque automotor de vehículos aumente en un 4,1 % por año, con lo cual se llegaría a 3,2 billones de neumáticos para 2022 [6], y aunque existen fuentes de aprovechamiento que buscan mitigar sus impactos, estos siguen representando un riesgo para la salud, la seguridad y el ambiente [7].

Por otro lado, el agotamiento constante de los combustibles fósiles y el aumento de la demanda de energía han motivado a investigadores y

tecnólogos a buscar y desarrollar diferentes fuentes de ésta. El desperdicio de energía ha sido una importante forma de utilizar los residuos de manera sostenible, haciéndolos útiles para satisfacer esta demanda [8].

De acuerdo con su composición, los materiales de desecho pueden clasificarse como materiales fósiles y materiales de origen biológico, los neumáticos de desecho son uno de los residuos más importantes a base de material fósil. Mientras que los desechos biológicos tienen un gran potencial como componente para las principales fuentes de energía renovable, ya que pueden proporcionar al mundo una alternativa para la reducción del uso de combustibles fósiles, los materiales de desecho a base de un material fósil como los ELT, por ser un residuo muy importante en términos de contaminación ambiental y aspectos económicos, aún son caso de estudio como fuente de energía renovable [9].

Las principales alternativas empleadas hoy en día para la disposición y tratamiento de ELT son la incineración y el depósito en vertederos. Sin embargo, ambas están lejos de ser opciones de tratamiento óptimo, porque pueden generar problemas ambientales, como emisiones tóxicas y de gases de efecto invernadero, lixiviados, etc. Ha habido iniciativas para reducir el desperdicio de neumáticos a través de las estrategias de reciclaje y reúso.

Como se muestra en la Figura 1, existen algunas alternativas de tratamiento en las que se emplean los neumáticos de desecho, sin embargo, actualmente solo el 35 % de los neumáticos en promedio se recicla, y el 50 % se usa para producir combustible derivado de neumáticos (TDF, por sus siglas en inglés) en los EE. UU., según reporta la EPA [10].

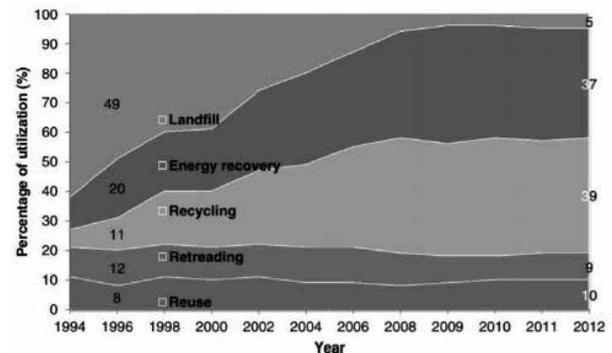


Figura 1. Desglose de la utilización de neumáticos usados en la UE de 1994 a 2012.

Fuente: Tomado de [1].

Vale la pena resaltar la importancia de un marco normativo que permita establecer una adecuada gestión de los residuos de ELT y motive a promover estrategias de aprovechamiento, como es el caso de la Unión Europea (UE), con su normatividad de Responsabilidad Ampliada del Productor (EPR, por sus siglas en inglés), mediante la cual se busca mejorar la recolección de residuos, reducir su generación mediante incentivos y diseño ecológico, y aumentar la eficiencia de los recursos a través de mayores tasas de reciclaje [11].

Se debe destacar que algunas de esas regulaciones incentivan a la industria para que utilice caucho reciclado en sus procesos, y en esta tendencia Taiwán fue pionero en llevar a la práctica dicha normatividad [12]. Posteriormente, Estados Unidos, Japón y los países de la UE incursionaron en este campo, de manera que hoy en día son las regiones con el mayor grado de desarrollo en cuanto a legislación sobre esta temática (ver Tabla 1).

Tabla 1. Normatividad sobre disposición y manejo de ELT

País	Norma	Año	Regulación
UE	Directiva 1000/31/EC	1999	Prohibición de la disposición de ELT enteros o triturados en los rellenos sanitarios [12].
UE	Directriz 2000/53/EC	2000	Establece que los neumáticos de los autos deben ser retirados antes de que estos sean chatarrizados [12].
UE	1222/2009	2009	Etiquetado y seguimiento de los neumáticos [12].
Colombia	Resolución 1457	2010	Modelo de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para la gestión de ELT [13].
Colombia	Resolución 1326	2017	“Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de los neumáticos usados y se dictan otras disposiciones”.
Colombia	ANLA		La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales es la entidad del Estado encargada de hacer seguimiento a los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental, en este caso llantas usadas

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información de la Tabla 1, en Colombia es insuficiente la normatividad que permita ser más estrictos respecto a la producción, manejo y disposición de neumáticos, por lo cual es importante tener un horizonte como países de la UE en esta parte normativa para mejorar la gestión de estos residuos.

El objetivo de esta revisión es identificar las diferentes técnicas de aprovechamiento de los neumáticos al final de su vida útil para la obtención de energía que pueda ser usada como fuente de suministro en la industria colombiana.

Para lo anterior, se aplicó una metodología de tipo exploratorio, se empleó como técnica de

recolección de la información la observación no participativa, a través de la selección y análisis de información cualitativa y cuantitativa relacionada con el objeto de estudio. Para esto se partió de una revisión bibliográfica en bases de datos indexadas sobre técnicas alternativas para el aprovechamiento de residuos de neumáticos, haciendo énfasis en aquellos tratamientos que permitieran un aprovechamiento energético de los mismos, y de esta manera poder registrar características y criterios empleados en los diferentes tratamientos identificados, con el fin de reconocer un panorama de procesos diferentes a la disposición final en rellenos sanitarios y que a futuro se puedan llevar a la práctica en nuestro país.

Situación de los neumáticos a nivel nacional

Colombia genera 5.300.000 llantas usadas al año, lo que equivale a 100.000 toneladas de residuos sólidos para el año 2015. De esa cifra, 2 millones se producen en Bogotá, un poco más de la cuarta parte (37,7 %), de acuerdo con informe del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, basado en el reporte del Programa Posconsumo de la ANDI [14]

En la Tabla 2 se muestra la generación por regiones de llantas usadas en Colombia, correspondiente a un valor total de 190.494 ton, lo que representa un aumento superior al 90 % en un periodo de dos años.

Tabla 2. Generación de llantas en Colombia por regiones.

Región	Porcentaje	Ton de llantas
Cundinamarca	28,22	53.760
Antioquia	18,31	34.881
Eje Cafetero	6,78	12.916
Costa Atlántica	13,72	26.137
Valle	17,27	32.900
Otras regiones	15,70	29.900

Fuente: tomado de [14 p. 79].

Por otra parte, con respecto a los puntos de recolección y almacenamiento, Colombia cuenta con 277 puntos de recolección y 187 centros de acopio distribuidos estratégicamente para garantizar la recolección y la gestión adecuada de las llantas usadas y lograr el cumplimiento de las metas. las llantas posteriormente serán utilizadas por diferentes industrias para usos energéticos o comerciales, como es el caso de Cementos Argos quien tiene un convenio con la Administración de Bogotá y que aprovecha alrededor de 20.000 ton/año como combustible alternativo en el horno cementero de Rioclaro mediante un proceso conocido como coprocesamiento.

Adicionalmente, de las llantas usadas se pueden obtener subproductos que son utilizados para mezcla asfáltica, canchas sintéticas, parques, combustible alternativo, etc. También se exportan a países como México para darles diferentes usos industriales. En Colombia existen 18 sistemas de recolección aprobados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), de los cuales 7 son colectivos y agrupan 270 empresas importadoras de vehículos y neumáticos, los 11 restantes son individuales [15].

Definición y composición de los neumáticos

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire, el cual soporta tanto el vehículo como su carga.

El ciclo de vida de un neumático consta de cinco pasos básicos: la extracción de las materias primas, la producción del neumático con las materias primas, el uso del neumático para vehículos/camiones, la recolección del neumático como desecho después del uso, y el procesamiento o reciclaje del neumático de desecho [16].

Los neumáticos comprenden más de cien compuestos diferentes, según el fabricante y el uso. Básicamente, están hechos de caucho (60-65 % en peso), negro de carbón (25-35 % en peso), rellenos (3 % en peso) y aceleradores [17]. Se utiliza una mezcla de caucho natural del árbol *Hevea brasiliensis* y caucho sintético derivado de productos del petróleo.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira, siendo esta una de sus principales características, ya que poseen una estructura de red que puede deformarse a corto plazo bajo la influencia de fuerzas externas. Hoy en día alcanzan el 30 % del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos, todos basados en hidrocarburos. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación

de los neumáticos son: cauchos naturales (NR), polibutadienos (BR), estireno-butadieno (SBR) y polisoprenos sintéticos (IR). La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en la cual la proporción en peso de estireno es de aproximadamente un 25 %, o una mezcla de caucho natural y SBR. Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero tienen algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que requieren una gran cantidad de tiempo para su degradación [18].

Los cauchos y elastómeros que forman el componente de goma del neumático son una mezcla de varios cauchos reforzados con material de relleno de negro de humo, la construcción del neumático implica un compuesto de varias capas de caucho, material textil y correa y cordón de acero [19].

El negro de carbón, por su parte, se utiliza para fortalecer el caucho y permitirle resistir la abrasión, ya que aumenta la tenacidad y la resistencia a la torsión y al desgaste. Es además usado como pigmento y ayuda a disipar el calor de las zonas de la huella y el cinturón del neumático, de modo que reduce el daño térmico e incrementa la vida de la goma [19].

Para hacer que la goma sea más suave y trabajable, se adicionan rellenos o plastificantes para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, los cuales se utilizan para el control de la viscosidad, reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto: aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster [19]. Además, se aplican otros componentes, a saber: azufre como agente vulcanizante, que se usa para entrecruzar las cadenas de polímeros en el caucho; acelerantes, que son compuestos órgano-sulfurados como benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico y, finalmente, retardantes, como el N-nitroso difenil amina, usado como agente de curado de caucho y en resinas de intercambio iónico y decolorantes, y se emplea como promotor para adherir hilos de neumáticos al caucho.

Hoy en día, de estos componentes una pequeña porción es aprovechada a través de diferentes tratamientos, cuyo objetivo principal es recuperar el caucho triturado en varios tamaños y tipos para la obtención de energía (debido al alto contenido de carbono) [20], el aprovechamiento de sus fibras textiles, así como la fibra de acero, que juntos representan la porción principal de materia [21].

En la Figura 2 se presenta la composición de los neumáticos a) Neumático de carro, B) Neumático de Camión, la cual brinda una idea con respecto a las técnicas de valorización que se pueden investigar y a las estrategias de aprovechamiento según el producto que se quiera obtener al final, por lo cual su composición también puede variar de acuerdo con el uso al cual será destinado el neumático.

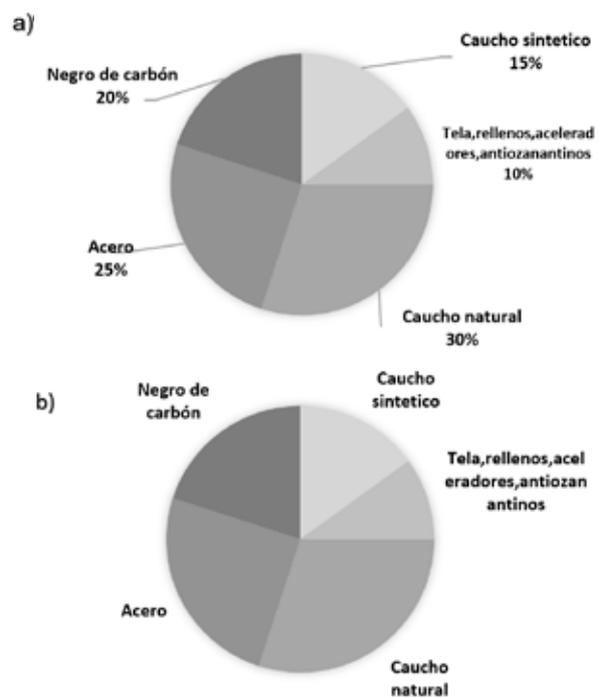


Figura 2. Composición de los neumáticos. a) Neumático de carro. b) Neumático de camión.

Fuente: Tomado de [22].

Otros materiales agregados al caucho para mejorar sus propiedades son: suavizantes, que aumentan su trabajabilidad antes de la vulcanización; óxido de zinc y de magnesio, comúnmente denominados

activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos, y antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono [18].

Tabla 3. Composición química de neumático.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL	
Carbono	70-83 %
Hidrógeno	5-7,5 %
Nitrógeno	1,50 %
Azufre	1,2-1,9 %
Oxígeno	5 %
Zinc	1,2-1,7 %
Hierro	5-18 %
Otros	5 %
ANÁLISIS PRÓXIMO	
Volátiles	62,10 %
Carbono fijo	29,40 %
Ceniza	7,10 %
Humedad	1,30 %

Fuente: tomado de [23].

Almacenamiento de neumáticos

El almacenamiento de ELT a cielo abierto tiene dos efectos perjudiciales principales: crea sitios para la reproducción de vectores como mosquitos dada la acumulación de agua estancada en ellos y genera afectaciones al aire debido a su ignición, ya que una vez iniciada es difícil de controlar [3].

Principales métodos de eliminación y aprovechamiento de neumáticos

Métodos de eliminación

Los métodos de eliminación de ELT más comúnmente usados son: vertederos, contención e incineración, los cuales han demostrado ser una amenaza para el medioambiente.

Relleno sanitario: La disposición de ELT consume una gran cantidad de tierra fértil de gran valor en usos productivos, especialmente en las áreas cercanas a la ciudad. Los neumáticos desgastados son materiales incompresibles y tienen más del 75 % de espacio ocupado por huecos. Proporcionan sitios potenciales para la cría de roedores y la recolección de gases. El gas metano (que se genera en los rellenos sanitarios y es producto de la descomposición misma del componente orgánico) es retenido por la presencia de neumáticos y ejerce una acción de flotador hacia arriba, que puede dañar o perforar los rellenos sanitarios. Este fenómeno se conoce como efecto burbujeante de los neumáticos de desecho. El efecto de burbujeo también puede conducir a la contaminación de los cuerpos de agua y destruye las bacterias convenientes para el suelo [3].

Quema de neumáticos: La quema de neumáticos no solo aumenta la temperatura del entorno, sino que también volatiliza toxinas al aire por la emisión de gases como hidrocarburos poliaromáticos, CO, SO₂, NO₂ y HCl. También libera contaminantes peligrosos del aire, como hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP), dioxinas, furanos, benceno, bifenilos policlorados (PCB) y metales como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio [3]. La quema de neumáticos gastados y aglomerados conduce a la descomposición de parte del caucho que lo conforma en un material aceitoso, el cual es insoluble y genera contaminación en la superficie y en el agua subterránea por compuestos como azufre y dioxinas [3].

Aprovechamiento por reciclaje

La preocupación por la contaminación asociada con la eliminación de los neumáticos ha llevado a la búsqueda de tecnologías para reutilizar neumáticos desechados, que incluyen la valorización energética, y la introducción como materia prima en la construcción de edificios, en el procesamiento de la superficie de asfalto, en la industria del calzado, entre otras [24].

Para reciclar los neumáticos, sus materiales deben triturarse y luego separarse en sus componentes de caucho, acero y fibras textiles. Los posibles

materiales de salida se utilizan en la producción de asfalto modificado con caucho y para aplicaciones de ingeniería civil. Los productos derivados de neumáticos compuestos de pequeñas virutas se pueden usar para reemplazar materiales de construcción convencionales. Los beneficios de usar virutas de neumáticos en lugar de materiales convencionales son: una densidad reducida del material de construcción, mejores propiedades de drenaje, mejor aislamiento térmico y reducción de ruido [25].

Métodos de aprovechamiento térmico

Es bien sabido que los neumáticos poseen bajo contenido de cenizas de alta volatilidad y un poder calorífico superior al del carbón y de la biomasa. Estas propiedades los hacen materiales ideales para procesos térmicos como la pirólisis, la gasificación y la licuefacción [26].

El combustible derivado de neumáticos (TDF) se puede derivar de ELT de todo tipo, incluyendo neumáticos enteros o neumáticos triturados TDF, y se puede utilizar en instalaciones industriales, tales como fábricas de cemento, fábricas de papel y centrales eléctricas [25].

En 2017, alrededor del 40% de las llantas de desecho generadas en los EE. UU. fueron combustible para generación de energía en fábricas de papel y otras industrias, mientras que el 25 % se utilizaron como caucho molido para paisajismo, y alrededor del 8 % en otras aplicaciones civiles de ingeniería [27]. A pesar de que la combustión directa es útil para la generación de energía, como la energía térmica, las emisiones contaminantes producidas durante la combustión de neumáticos desalientan el uso de este proceso, en vista de las preocupaciones ambientales y de salud pública [28]. Como alternativa a esta problemática, la pirólisis y la gasificación son procesos termoquímicos avanzados, técnicas de conversión que ofrecen una gestión favorable de los residuos [6], en tanto se realiza un tratamiento y control de los contaminantes generados durante su proceso, sin embargo, también presentan sus inconvenientes, como son: la incapacidad de cumplir con los límites de control de contaminación, el daño corrosivo al equipamiento (como el colapso del techo y la

chimenea de acero de una planta de gasificación en Hamm-Uentrop, Alemania) por los problemas para mantener temperaturas de reacción adecuadas, y la ineficiencia energética [29].

Gasificación: “La gasificación es una oxidación subestequiométrica de la materia orgánica. Se define como un proceso termoquímico que tiende a ser más reactivo que otros procesos, el cual se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre (700-1400 °C) y en presencia de una atmósfera reactiva parcialmente oxidativa. Implica el uso de aire, oxígeno (O₂), hidrógeno (H₂) o vapor de agua como agentes de reacción. Su eficiencia energética es alrededor del 76 % “. [26].

La gasificación de llantas de desecho es una ruta de utilización atractiva, ya que los productos gaseosos se pueden almacenar, transportar y, con ellos, alimentar fácilmente las calderas y cámaras de combustión existentes con pocas modificaciones (ver Figura 3) [30], [31]. La gasificación por vapor de neumáticos usados tiene el potencial de producir gas de síntesis de calidad. Sin embargo, los sistemas de gasificación convencionales requieren altas temperaturas para descomponer el material de alimentación y de reacciones que influye en la eficiencia general del proceso [32].

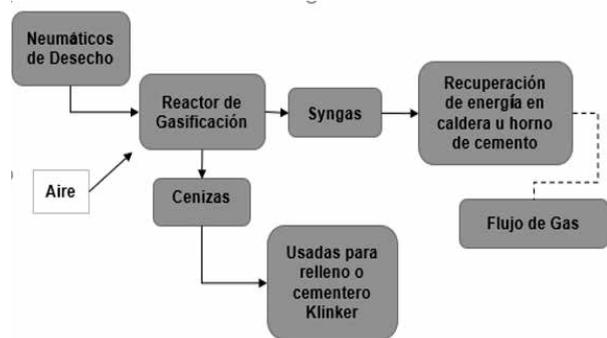


Figura 3. Proceso de gasificación.

Fuente: elaborado con base en [26] (Traducción propia).

Licuefacción: “La licuefacción es la conversión termoquímica de un sólido orgánico en petróleo como líquido. Típicamente, la licuefacción implica la producción de un líquido conformado por compuestos moleculares pesados con

propiedades similares, pero no idénticos a los de los combustibles derivados del petróleo. Los mecanismos involucrados en el proceso de licuefacción de neumáticos usados son: difusión de disolvente en el caucho, hinchazón de goma, degradación del caucho, disolución de caucho y separación del producto insoluble” [26].

Con esta técnica es posible un rendimiento de hasta el 90,2 %. Los neumáticos pueden licuarse individualmente o en combinación con otros materiales de desecho y/o carbón en esquemas de coprocesamiento, en procesos de una o dos etapas. La licuefacción proporciona un método efectivo para convertir el contenido orgánico en aceites [26](Muzenda, 2014).

Pirólisis: “La pirólisis es un proceso endotérmico que induce temperatura para la descomposición de materiales de alimentación sin la adición de gases reactivos, como aire u oxígeno. La eficiencia térmica de este proceso es aproximadamente del 70 % y puede aumentar al 90 % con el uso de productos pirolíticos como combustible [26] (Muzenda, 2014). El uso de neumáticos de menor tamaño como las virutas, en lugar de neumáticos enteros, también puede aumentar la eficiencia del proceso en un 20-30 %. Algunos de los problemas relacionados con el proceso son: el alto costo de la planta y el tratamiento de residuos” [26](Muzenda, 2014), los cuales oscilan aproximadamente entre \$8.000 y \$11.500 dólares por kW [29] (Wilson, 2017). La pirólisis generalmente ocurre a temperaturas entre 400 y 800 °C [33](Mohajerani et al., 2020). En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo esquemático para un proceso de pirólisis.

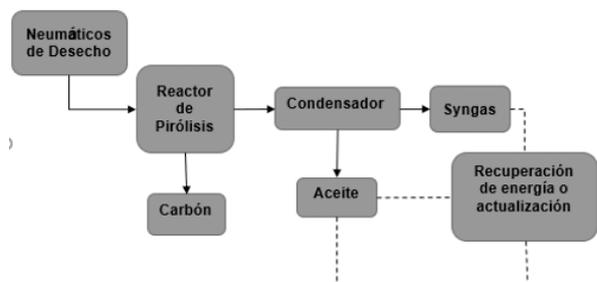


Figura 4. Proceso de pirólisis.

Fuente: elaborado con base en [26] (Traducción propia).

De acuerdo con los parámetros operativos, la pirólisis se puede clasificar como pirólisis lenta, rápida y *flash*.

La pirólisis lenta ocurre a una temperatura de proceso más baja, una velocidad de calentamiento más baja y tiempos de residencia más largos, lo que favorece la producción de carbón. La pirólisis instantánea o *flash* es el proceso en el que el tiempo de reacción es de solo varios segundos, o incluso menos, y la velocidad de calentamiento es muy alta; debido al rápido calentamiento, el tamaño de las partículas debe ser pequeño. La pirólisis rápida favorece la formación de bioaceite y se produce a una temperatura moderada, un tiempo de residencia corto del vapor y alta velocidad de calentamiento.

La pirólisis rápida para la producción de líquidos se ha desarrollado considerablemente en los últimos años. Los productos líquidos ofrecen importantes ventajas en almacenamiento y transporte. La tecnología de pirólisis rápida puede tener costos de inversión relativamente bajos y alta eficiencia energética en comparación con otros procesos, especialmente a pequeña escala tiene inversiones de capital menores, eficiencia mejorada y aceptabilidad ambiental [34], como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros operativos y productos típicos para el proceso de pirólisis.

Técnica pirolítica	Período de asentamiento sólido (min)	Velocidad de calentamiento (°C / s)	Tamaño de grano (cm)	Temperatura. (°C)	Producir (proporción)		
					Aceite	Carbón	Gas
Lento	7,5-9,16	0,1-1	0,5-5	277-677	0,30	0,35	0,35
Rápido	0,0083-0,16	10-200	<0,1	577-977	0,50	0,20	0,30
Flash	<0,0083	>1000	<0,02	777-1023	0,75	0,12	0,13

Fuente: [35].

Otros autores [34], [36], mencionan al respecto que el tipo de biomasa usada también tiene un efecto en el proceso, donde numerosos estudios mostraron que la temperatura para obtener mayores rendimientos líquidos oscila entre 450 y 550 °C, sin embargo, de acuerdo con la biomasa usada algunos obtienen mayores rendimientos a temperaturas que oscilan entre 650 y 800 °C.

Tipos de reactores: La etapa de reacción, en la que se realiza el proceso de pirólisis, se puede llevar a cabo usando diferentes tecnologías que dependen de la naturaleza del lecho del reactor y de aspectos prácticos de su operación. A continuación, se presentan los principales tipos de reactores según la literatura y por su aplicabilidad industrial:

- **Reactor de lecho fluidizado.** Es el reactor más estudiado y desarrollado por su amplia aplicabilidad en la industria petrolera para reacciones de *cracking* catalítico, tiene una configuración vertical y en procesos de pirólisis la materia prima es alimentada por la parte superior del reactor para que al llegar al fondo entre en contacto con el medio fluidizado de transferencia de calor, el cual, por lo general, es arena u otro sólido inerte. El medio fluidizado cumple la función de mejorar la transferencia de calor o actuar como catalizador del proceso, además, su calentamiento puede ser directo, o de forma indirecta por medio del gas de fluidización, que es de carácter inerte con respecto a la materia prima o el sustrato que se va a descomponer térmicamente [37]. Los reactores de lecho fluidizado operan en condiciones de pirólisis rápida, lo que mejora el rendimiento del aceite de pirólisis. Además, esta tecnología facilita el funcionamiento continuo, lo que es de gran relevancia para la ampliación del proceso. Sin embargo, estos reactores son de diseño y operación complejos y, además, requieren una mayor inversión que otras tecnologías, lo que dificulta su utilización. Otro punto que debe evaluarse cuidadosamente es el pequeño tamaño de partícula requerido para los neumáticos [38].
- **Reactor de cono rotatorio.** Consta de un recipiente de reacción vertical en el que un lecho o cama de materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono, lo cual reduce el consumo de gas de fluidización y mejora la transferencia de calor, su calentamiento también puede ser directo o indirecto. Sin embargo, su uso se ha restringido a plantas piloto y no ha sido escalado a escala industrial [37].
- **Reactor de tornillo sinfín.** Su funcionamiento es análogo al esquema de funcionamiento para un reactor de cono rotatorio, en donde la materia prima entra en contacto directo con el lecho de calentamiento y se mezcla el conjunto en un recipiente horizontal por medio de un tornillo sinfín. Este reactor no usa gas de fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión [37].
- **Reactor de lecho fijo.** A diferencia de un reactor de lecho fluidizado, son recipientes verticales en los que se calienta únicamente el fondo del reactor, lo que genera un perfil térmico a lo largo de sus paredes, su calentamiento es, en la mayoría de los casos, indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre para extraer la fracción volátil generada y evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas [37]. Este es uno de los procesos más usados en la pirólisis de neumáticos, principalmente a escala de laboratorio. El principal interés de los reactores de lecho fijo radica en su fácil diseño y funcionamiento, ya que no tienen limitación en cuanto al tamaño de las partículas de los neumáticos. Sin embargo, estos reactores se caracterizan por su baja tasa de transferencia de calor y su complejo control de las condiciones operativas, especialmente la temperatura. Además, su ampliación es un desafío notable debido, por un lado, a las severas limitaciones de

transferencia de calor a medida que aumenta el volumen del reactor y, por otro lado, a grandes dificultades para el funcionamiento continuo. Por lo tanto, la baja capacidad específica limita el interés económico de los reactores de lecho fijo para aplicaciones a gran escala [38].

- **Reactores de horno rotatorio.** Es el tipo de reactor más usado industrialmente por su gran similitud con los hornos rotatorios de la industria cementera, aunque en procesos de pirólisis su calentamiento se da de manera indirecta con gases de combustión para prevenir fluidización de la materia prima y operaciones de separación de material sólido suspendido en la fracción volátil. La configuración del reactor es totalmente horizontal u horizontal con una leve inclinación, lo cual permite operar el proceso de manera discontinua o continua respectivamente [37], en unos procesos realizados, según [39], en Kobe Steel (Japón), el Centro de Investigación ENEA (Italia) y la Universidad de Kassel (Alemania). Se obtuvieron mayores rendimientos de aceite operando a 550 °C, junto con los rendimientos de gas más bajos, sin embargo, el carbón no pareció verse afectado significativamente por los cambios de temperatura.

Principales parámetros de operación: entre los parámetros más influyentes en los procesos de pirólisis se destacan los que tienen mayor efecto en el producto del aprovechamiento.

Los parámetros del proceso afectan fuertemente el rendimiento y la composición de los productos de pirólisis, debido a las diversas reacciones químicas que se favorecen en cada condición. Los principales parámetros son: tamaño de partícula, velocidad de calentamiento, temperatura de pirólisis, velocidad de flujo de gas, velocidad de alimentación, tiempo de retención y composición de biomasa [34].

- **Temperatura:** Esta es la principal variable a tener en cuenta dentro del proceso de pirólisis, por ser la que más lo afecta. La temperatura óptima (a presión ambiente) para la conversión total del neumático son los 500 °C [28].

La producción de aceite pirolítico oscila entre los 425 y los 720 °C, y los rendimientos máximos varían entre 38 y 60 %, lo cual se relaciona estrechamente con la velocidad del flujo másico del neumático y el tamaño de las partículas, el tipo de reactor y el tiempo de residencia, ya que en algunos casos estos parámetros pueden ocasionar reacciones secundarias que convierten compuestos líquidos en gaseosos o gaseosos en fase sólida, según [40].

Algunos rendimientos del bioaceite, como se menciona en [34], dependen de la biomasa usada, es el caso de la cáscara de arroz, con la cual se observó un aumento en el rendimiento de aceite cuando la temperatura de pirólisis cambia de 400 °C a 500 °C, de 11,26 % a 35,92 %, respectivamente. Sin embargo, por encima de 500 °C el rendimiento aumentó a un ritmo menor con el aumento de temperatura y alcanzó el 40 % a 800 °C; con la semilla de mango almendra la temperatura de pirólisis osciló entre 450 °C y 650 °C. El rendimiento máximo de bioaceite obtenido fue del 38,8 % a la mayor temperatura (650 °C).

- **Velocidad de calentamiento:** La velocidad de calentamiento y la temperatura final son variables independientes y se pueden parametrizar de forma separada. Sin embargo, las velocidades de calentamiento más rápidas conducen a temperaturas más altas, lo que puede llevar a más reacciones secundarias que pueden producir más productos en fase gaseosa [40]. Se ha encontrado que altas velocidades de calentamiento reducen el contenido de agua en el bioaceite, producto de la pirólisis, y también en el contenido de oxígeno en el producto líquido de la pirólisis, por reacciones que favorecen la formación de gases como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono en dicho producto [34]. La velocidad de calentamiento está relacionada con el tipo de reactor, y algunos de ellos producen velocidades más altas de calentamiento [40], [28].
- **Tamaño de la partícula:** A partículas más pequeñas se tienen temperaturas uniformes durante el proceso de pirólisis, aunque existe la

probabilidad de pasar fácilmente de fase líquida a una fase gaseosa, mientras que tamaños de partículas más grandes tienen un calentamiento menos uniforme, debido a una afectación en la transferencia de calor y por lo tanto la pirólisis ocurre a una temperatura más baja [28].

Según se afirma en [40], partículas pequeñas con tamaños aproximados de 0,32 mm generan un mayor producto en fase líquida (50 % en peso), mientras que partículas de mayor tamaño, 0,8 mm, generan un 40 % en peso.

La transferencia de calor durante la pirólisis presenta dificultades porque la biomasa es un mal conductor del calor. Por lo tanto, el tamaño de las partículas influye en el rendimiento del bioaceite producido y es fundamental para minimizar los problemas de transferencia de calor en el proceso [34].

- **Composición de la materia prima (neumático):**

Este parámetro tiene una gran influencia en las variaciones del rendimiento líquido y el contenido de azufre dentro del producto final. Alsaleh y Sattler [40] encontraron que neumáticos con mayor contenido de caucho natural generaban una mayor cantidad de aceite (55,6 % en peso) con un menor contenido de azufre (0,83 % en peso), en comparación con los neumáticos con mayor contenido de caucho sintético, que generaban 47,4 % en peso de aceite con 1,35 % en peso de azufre, lo que traduce su uso final, siendo los de caucho sintético más usados para la producción química por su mayor contenido aromático, mientras que neumáticos con mayor contenido de caucho natural tienen más potencial como combustible.

- **Tiempo de pirólisis:** El tiempo de pirólisis está relacionado con la velocidad de calentamiento: velocidades de calentamiento más bajas que requieren tiempos de pirólisis más largos. Los tiempos de residencia más largos requieren un reactor más grande, con mayores costos de capital. Finalmente, varios investigadores han encontrado una compensación de tiempo

y temperatura: temperaturas más altas que requieren tiempos de residencia de neumáticos más cortos, y temperaturas más bajas requieren tiempos de residencia más largos [34].

En resumen, se mencionaron algunos de los parámetros más influyentes que se deben tener en cuenta para la proyección de un esquema financiero, con el fin de obtener mayor precisión al momento de introducir este proceso como fuente de energía para abastecer el suministro en procesos industriales [40].

Análisis del aprovechamiento térmico de la pirólisis utilizando residuos de neumáticos

Con respecto a los reactores de pirólisis para la obtención de aceite que puede ser potencialmente usado como fuente de energía, se presentan las proporciones halladas en los estudios evaluados que mayor información brindan, el panorama muestra que son los reactores de cama fija (27 % de participación), de lecho fluidizado y de horno rotativo (con 20 % de participación cada uno) (Figura 5), los que presentan más ventajas. De los estudios evaluados, el proceso de pirólisis en lecho fluidizado ha despertado gran interés debido a que estos presentan diferentes ventajas; tales como: estructura simple, utilización de diferentes diámetros de partículas, fácil operación, fácil escalado, altos flujos de transferencia de calor y masa y altos rendimientos de los productos líquidos [41], los cuales presentan resultados similares o datos cercanos a los obtenidos por otros autores en cuanto a niveles de rendimiento del aceite [23], [42], [43].

Sin embargo, es importante resaltar la necesidad de aunar esfuerzos para obtener mejor información en otros procesos, como los de reactores al vacío, los cuales pueden permitir obtener rendimientos altos, que fueron del 60 % a temperaturas óptimas medias de 425 °C, según los datos encontrados, lo cual abre una puerta a tecnologías sobre las cuales se debe seguir siendo investigando y ampliar la información con el fin de hallar mayor número de similitudes en los estudios.

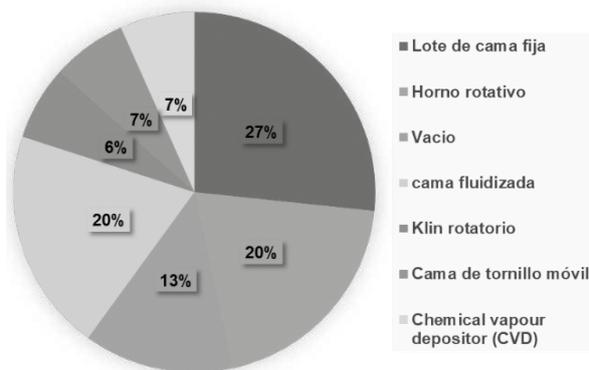


Figura 5. Porcentaje de los tipos de reactores para aprovechamiento de neumáticos.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información recolectada en la literatura, con respecto a los principales factores que influyen para una adecuada eficiencia en la pirólisis, teniendo en cuenta los tipos de reactores, se desglosan en la Tabla 4 los principales parámetros de operación en el proceso de pirólisis según el tipo de reactor, para obtener un rendimiento adecuado, tales parámetros son: velocidad de calentamiento, tamaño de partícula, masa del neumático y temperatura de operación. De esta manera, se logran obtener datos comparativos respecto de temperaturas óptimas de calentamiento y porcentaje de máximo rendimiento, los cuales permiten obtener un alto rendimiento y un producto de calidad sin exceder de manera innecesaria el gasto de energía; es así como algunos estudios [23], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49] determinan valores tanto para temperaturas óptimas de calentamiento como para el porcentaje de máximo rendimiento, los cuales son de gran utilidad al momento de implementar una tecnología de valoración energética.

De acuerdo a la información detallada, se pueden extraer datos como masas de neumático bajas, de alrededor 0,025 kg, asociadas a pequeños tamaños de las partículas de 5 cm aproximadamente que alimentan el reactor, contribuyen en alta medida a la favorabilidad de la pirólisis y permiten un cambio de estado sólido a líquido adecuado de

la materia prima, sin generar gran cantidad de reacciones secundarias que finalmente afecten el rendimiento del producto.

Con base en los parámetros detallados en la Tabla 4, es posible identificar y controlar, de acuerdo con el tipo de reactor que se emplee para el desarrollo de una pirólisis con una biomasa de ELT, la calidad del rendimiento del producto de aceite pirolítico final, porque un porcentaje alto o bajo de uno de estos parámetros puede generar una reacción innecesaria o inadecuada en el proceso. Según [40], estos factores secundarios pueden influir particularmente en las reacciones secundarias, que convierten los compuestos líquidos en fase gaseosa, o la fase gaseosa en fase sólida, es decir, pueden afectar la composición del gas y el líquido, así como el tiempo de pirólisis y el gasto de energía en el proceso.

En la Figura 6 se relacionan los diferentes estudios por tipo de reactor, y se presentan valores de rendimiento a partir de temperaturas óptimas, las cuales se obtuvieron bajo condiciones y parámetros establecidos, como son: masas de neumáticos, tamaños de la partícula y velocidades de calentamiento; a partir de la velocidad se puede obtener una temperatura óptima de calentamiento, la cual es la variable más influyente para un adecuado rendimiento, y se ha encontrado que los mayores niveles de rendimiento se presentan a temperaturas aproximadas a los 450 °C y 550 °C, llegando a obtener rendimientos entre el 50 y el 60 %. Es decir que no se requiere llevar el sistema a temperatura muy elevada para obtener un mejor rendimiento, lo cual se demuestra en [50], donde se mostró que durante la pirólisis de neumáticos usados en un reactor de lecho fijo las condiciones óptimas de rendimiento del líquido fueron: un tamaño de partícula igual a 4 cm, una temperatura experimental de 475 °C y un tiempo de residencia de 5 s. Mientras que en [42] el estudio se centró en la influencia de la alimentación por tamaño en los rendimientos del producto de pirólisis, y mostró que el tamaño de partícula más grande favorece la descomposición incompleta, lo que genera un aumento en el residuo sólido y el pirogás y una cantidad limitada de aceite, lo que se traduce en un menor rendimiento. Sin embargo, en [51] se

menciona que los rendimientos y las propiedades del producto dependen en gran medida de diferentes factores, a saber: la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula, la composición de la materia prima, el tiempo de pirólisis y el tipo y el diseño del reactor, donde la temperatura es un factor predominante que influye en la distribución de productos de pirólisis en fase sólida, gaseosa y líquida y en sus propiedades fisicoquímicas.

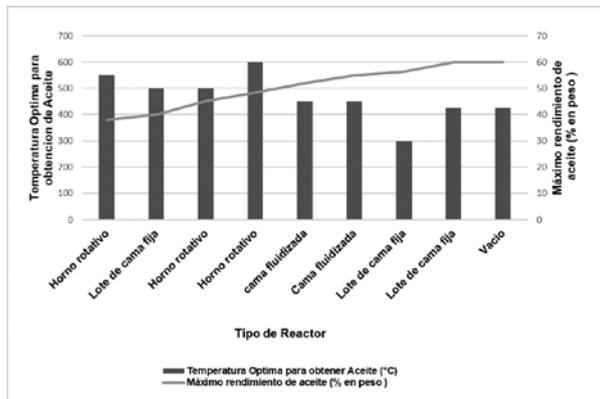


Figura 6. Máximo rendimiento de aceite frente a temperatura óptima.

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la Figura 7 se agruparon los reactores por tipo para lograr visualizar de forma más detallada y clara los resultados obtenidos con ellos por los diferentes autores (ver Tabla 4), así como los mayores rendimientos obtenidos a bajas temperaturas, lo cual no solo brinda información de lo hallado en los estudios, como parámetros de condiciones de laboratorio, tiempos, velocidades de calentamiento, etc., bajo los cuales pueden ser replicados, ya sea para un estudio en laboratorio o a nivel industrial bajo los parámetros descritos. Esto es un gran aporte a la investigación, porque se puede garantizar menor gasto energético para obtener un producto. Los datos más similares se lograron a través de reactores de cama fluidizada, siendo estos una de las tecnologías comúnmente utilizadas, como se argumenta en [52], donde los

reactores de cama fluidizada son los más usados y despiertan mayor interés, ya que la fluidización del lecho mejora la transferencia de calor de la materia prima, porque el movimiento de las partículas generado por el gas de arrastre permite un incremento en la tasa de degradación térmica al exponer de manera directa cada partícula al flujo de calor. Sin embargo, la dificultad al construir este tipo de reactor es que se requiere una cantidad de espacio considerable. Además, es importante considerar que la cantidad de gases que produce la pirólisis incrementa con la cantidad de materia prima que la alimenta, la cual es una variable que depende de las dimensiones del reactor, adicionalmente, tiende a presentarse mayor rendimiento y producción de aceite a medida que el tamaño de la partícula disminuye.

Es decir, la principal ventaja de este tipo de lecho fluidizado, según [53], es homogeneizar la tasa de degradación de la materia prima, esto es, lograr que la velocidad de degradación térmica de cada partícula sea homogénea para cada una, lo cual permitiría obtener rendimientos de fase líquida mucho más altos, porque todas las partículas reciben energía en la misma proporción.

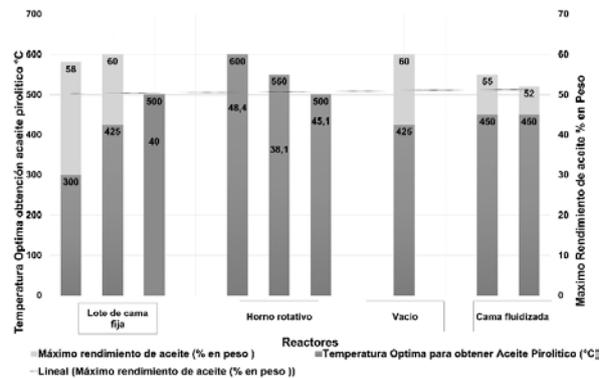


Figura 7. Agrupación de reactores: Máximo rendimiento de aceite frente a temperatura óptima

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de los parámetros que influyen en el rendimiento del aceite.

Autor (año)	Tipo de reactor	Masa del neumático ^a	Tamaño de la partícula (mm)	Rango de temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Temperatura óptima para obtener aceite pirolítico (°C)	Máximo rendimiento de aceite (% en peso)
Williams y Taylor (1990) [54]	Lote de cama fija	0,05 (a)	S. I.	300-720	5-80	300	54-58,8
Kar (2011) [48]	Lote de cama fija	0,01 (a)	S. I.	375-500	10	425	60
Aydina and C. İli-İkiliçb (2012) [47]	Lote de cama fija	S. I.*	S. I.	400-700	S. I.	500	40
Aylón et al. (2008) [44]	Horno rotativo	3,5-8 (b)	S. I.	600-800	S. I.	600	48,4
Galvagno et al. (2002) [45]	Horno rotativo ^b	4,8 (b)	S. I.	450-700	S. I.	550	38,1
Hu et al. (2014) [46]	Horno rotativo	S. I.	S. I.	450-650	S. I.	500	45,1
Shah et al. (2008) [49]	Vacío	S. I.	S. I.	375-500	10	425	60
Williams y Brindle (2003) [23]	Cama fluidizada ^c	0,22 (b)	S. I.	450-600	S. I.	450	55
Dai (2001) [42]	Cama fluidizada ^d	S. I.	S. I.	360-810	S. I.	450	52
Osayi et al. (2018) [43]	Cama fija	S. I.	1-4	400	S. I.	S. I.	38,80
	Cama fluidizada	S. I.	0,8-1,6	750	5-35	S. I.	31,9
	Vacío	S. I.	20 a 60	550	S. I.	S. I.	47,10
	Klin rotatorio	S. I.	13-15	500	20	S. I.	45,10
	Cama de tornillo móvil	S. I.	5	600	S. I.	S. I.	S.I.
	Depositantes de vapores químicos (CVD)	S. I.	6	600	15	S. I.	34,04

^a(a) kg, (b) kg h⁻¹

^bEscala de laboratorio

^cEscala de laboratorio

^dEscala de laboratorio

* S. I. = Sin Información.

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Los neumáticos (ELT) son hoy en día una problemática ambiental y de salud pública para muchos países del mundo, sin embargo, existen diversas alternativas no solo para su disposición final adecuada, sino para su aprovechamiento energético, lo que los hace de interés para ser usados como combustible, a fin de satisfacer las necesidades de muchas industrias y así disminuir el consumo de combustibles fósiles. La pirólisis es principalmente una alternativa viable que permite obtener tres tipos de combustible (sólido, líquido y gas), de acuerdo con la necesidad.

Los países en vía de desarrollo enfrentan una gran dificultad que tiene que ver con el factor de crecimiento poblacional, que con el paso de los años va a limitar los medios y sitios para realizar la disposición de gran parte de sus residuos, como los rellenos sanitarios, las combustiones o las alternativas de almacenamiento; de ahí que se deba fomentar el desarrollo y puesta en práctica de técnicas alternativas de aprovechamiento, como la pirólisis, la gasificación y la licuefacción, entre otras, las cuales permiten no solo disminuir el impacto al medioambiente sino que también generan una fuente de energía con estos residuos al final de su vida útil.

Actualmente en Colombia se evidencia la necesidad de una normativa que promueva el uso de estas tecnologías a través de incentivos que apoyen iniciativas de productores, generadores y consumidores de estos residuos de neumáticos, y así mejorar las tasas de aprovechamiento y mitigar el riesgo asociado a disposiciones inadecuadas, tanto en el medioambiente como en los rellenos sanitarios.

La pirólisis como medio para obtener energía (aceite pirolítico), a través de una fuente de masa como lo son los ELT, ofrece una ventaja que es la capacidad para tratar residuos difícilmente reciclables, para hacerlos reutilizables, descomponiéndolos en elementos más simples. Este tratamiento se usa para convertir los desechos en combustibles de alto poder calorífico, químicos, monómeros y otros

materiales valiosos y va a depender de diferentes factores como la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula, la composición de la materia prima, el tiempo de pirólisis y el tipo y diseño del reactor. Sin embargo, se encontró que el tamaño de partícula más grande favorece la descomposición incompleta, lo que genera un aumento en el residuo sólido y el gas con una cantidad limitada de aceite.

De acuerdo con los estudios revisados, los rendimientos del aceite obtenido mediante pirólisis según el tipo de reactor fueron superiores al 40 %. La temperatura, el tamaño de partícula y la velocidad de calentamiento tienen efectos importantes en el rendimiento de los productos de pirólisis. Una temperatura óptima apreciable son los 550 °C, en la que se completa la pirólisis del neumático y se obtienen los mismos rendimientos que a temperaturas más altas.

El principal interés en la valorización de neumáticos a partir de la pirólisis radica en la obtención de productos como gas, negro de humo y bioaceite, cuyo rendimiento y composición están limitados por la condición de la pirólisis, y en el caso del bioaceite, muchas veces el uso de catalizadores afecta su uso como combustible, debido a los hidrocarburos presentes, como aromáticos, parafinas, olefinas.

Es necesario ahondar más al respecto del aceite pirolítico, ya que es uno de los principales subproductos obtenidos de los diferentes procesos de aprovechamiento en la pirólisis, sin embargo, sigue siendo un reto indagar más sobre las limitantes asociadas a estos en su aplicación y potencial uso.

Referencias

- [1] J. Domingues, T. Marques, A. Mateus, P. Carreira, & C. Malça, "An additive manufacturing solution to produce big green parts from tires and recycled plastics", *Procedia Manufacturing*, n.º 12, December 2016, pp. 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.028>

- [2] A. Siddika, M. A. Al Mamun, R. Alyousef, Y. H. M. Amran, F. Aslani, & H. Alabduljabbar, "Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review", *Construction and Building Materials*, n.º 224, pp. 711-731, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
- [3] J. S. Yadav and S. K. Tiwari, "The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 21, n.º 2, pp. 485-568. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0054-2>
- [4] S. M. Samidi M. K. Samarakoon, P. Ruben, J. Wie and L. Evangelista, "Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, 2019, e00259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>
- [5] E. B. Machin, D. T. Pedroso and J. A. de Carvalho, "Energetic valorization of waste tires", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, 306-315, February 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.110>
- [6] M. Policella, Z. Wang, K. G. Burra, & A. K. Gupta, "Characteristics of syngas from pyrolysis and CO₂-assisted gasification of waste tires", *Applied Energy*, vol. 254, July 2019, 113678. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113678>
- [7] W. Ruwona, G. Danha and E. Muzenda, "A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres", *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 216-222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.029>
- [8] M. S. Hossain, M. R. Islam, M. S. Rahman, M. A. Kader and H. Haniu, "Biofuel from Co-pyrolysis of Solid Tire Waste and Rice Husk", *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 453-458, March 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.168>
- [9] S. Uçar, & S. Karagöz, "Co-pyrolysis of pine nut shells with scrap tires", *Fuel*, vol. 137, pp. 85-93, December 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.082>
- [10] A. Hasan and I. Dincer, "Assessment of an Integrated Gasification Combined Cycle using waste tires for hydrogen and fresh water production", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 36, pp. 19730-19741, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.075>
- [11] K. Winternitz, M. Heggie and J. Baird, "Extended producer responsibility for waste tyres in the EU: Lessons learnt from three case studies – Belgium, Italy and the Netherlands", *Waste Management*, vol. 89, pp. 386-396, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.023>
- [12] G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, "Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n.º 2, pp. 27-50, 2017.
- [13] V. Ramírez H. y J. Antero A., "Evolución de la normativa ambiental colombiana en función de las tendencias mundiales de desarrollo sostenible", *Revista NOOS*, vol. 3, pp. 34-55, 2013.
- [14] L. Patiño y M. Rodríguez, "Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones", *Revista Ontare*, n.º 5, pp. 1-34, 2018. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2004>
- [15] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), "Colombia aprovecha más de 59 millones de llantas usadas", ANLA Noticias [En línea], 12 de marzo 2018. Disponible en: <https://www.anla.gov.co/noticias/1150-colombia-aprovecha-mas-de-59-millones-de-llantas-usadas>

- [16] E. E. Okoro, N. O. Erivona, S. E. Sanni, K. B. Orodu, and K. C. Igwilo, "Modification of waste tire pyrolytic oil as base fluid for synthetic lube oil blending and production: waste tire utilization approach", *J. Mater. Cycles and Waste Manag.*, n.º 2, pp. 2258-2269, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01018-1>
- [17] C. Vargas, "Factibilidad del aprovechamiento energético de neumáticos usados en la gran minería del cobre mediante pirólisis", *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica 2017*. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i36.12017>
- [18] G. Castro, "Materiales y compuestos para la industria del neumático", *Material Complementario. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Buenos Aires, diciembre 2008. Disponible en: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Numatico.pdf*
- [19] P. T. Williams, "Pyrolysis of waste tyres: A review", *Waste Management*, vol. 33, n.º 8, pp. 1714-1728, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- [20] D. Landi, D., M. Marconi, M., I. Meo and M. Germani, "Reuse scenarios of tires textile fibers: An environmental evaluation", *Procedia Manufacturing*, vol. 21, n.º 2017, pp. 329-336, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.128>
- [21] V. Malijonyte, E. Dace, F. Romagnoli, I. Kliopova and M. Gedrovics, "A comparative life cycle assessment of energy recovery from end-of-life tires and selected solid waste", *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 257-264, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.064>
- [22] D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara and N. Spencer, "Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review", *Energy*, vol. 134, pp. 1121-1131, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
- [23] P. T. Williams and A. J. Brindle, "Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 67, n.º 1, pp. 143-164, 2003.
- [24] E. B. Machin, D. T. Pedroso and J. A. de Carvalho, "Technical assessment of discarded tires gasification as alternative technology for electricity generation", *Waste Management*, vol. 68, pp. 412-420, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.004>
- [25] P. Nowakowski and A. Król, "The influence of preliminary processing of end-of-life tires on transportation cost and vehicle exhausts emissions", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, n.º 35, pp. 1-14, 2021. doi: 10.1007/s11356-019-07421-y
- [26] E. Muzenda, "A Comparative Review of Waste Tyre Pyrolysis, Gasification and Liquefaction (PGL) Processes", *International Conference on Chemical Engineering & Advanced Computational Technologies (ICCEACT'2014)*, Nov. 24-25, 2014. Pretoria (South Africa).
- [27] U.S. Tire Manufacturers Association, "2017 U. S. Scrap Tire Management Summary", Washington, July 18, 2018.
- [28] J. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. García, M. V. Navarro and A. M. Mastral, "Waste tyre pyrolysis – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 179-213, July 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>

- [29] N. Tangri y M. Wilson, "Análisis del riesgo de la gasificación y pirólisis", *Gaia*, n.º 18. <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>
- [30] V. Belgiorno, G. de Feo, C. Della Rocca and R. M. A. Napoli, "Energy from gasification of solid wastes", *Waste Management*, vol. 23, n.º, pp. 1-15, 2003. Doi: 10.1016/S0956-053X(02)00149-6
- [31] A. Franco and N. Giannini, "Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, Issue 2, pp. 163-177, February 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.07.005>
- [32] S. Porto, S. Casu, P. Iovane, A. Russo, M. Martino, A. Donatelli and S. Galvagno, "Optimizing H₂ Production from Waste Tires via Combined Steam Gasification and Catalytic Reforming", *Energy Fuels*, vol. 25, pp. 2232-2241, 2011.
- [33] A. Mohajerani, L. Burnett, J. V. Smith, S. Markovski, G. Rodwell, Md Tareq Rahman, H. Kurmus, M. Mirzababaei, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and F. Maghool, "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 155, January 2020, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- [34] R. Escrivani Guedes, A. S. Luna and A. R. Torres, "Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 129, pp. 134-149, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- [35] R. D. Wankhade and T. Bhattacharya, "Pyrolysis oil an emerging alternate fuel for future (Review)", *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 6, n.º 6, pp. 239-243, 2017. Available: <http://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue6/PartD/6-4-382-970.pdf>
- [36] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 68-94, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [37] D. Chivatá Trompetero y C. C. Duarte Fuentes, "Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis", tesis de grado, Fundación Universidad de América, 2018.
- [38] M. Arabiourrutia, G. López, M. Artetxe, J. Álvarez, J. Bilbao and M. Olazar, "Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 129, May 2020, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- [39] I. Hita, M. Arabiourrutia, M. Olazar, J. Bilbao, J. M. Arandes and P. Castaño, "Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 745-759, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.081>
- [40] A. Alsaleh and M. L. Sattler, "Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties", *Current Sustainable / Renewable Energy Reports*, n.º 1, pp. 129-135, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40518-014-0019-0>
- [41] F. Esaclona, S. Rodríguez, J. Antonio and A. Beatón, "Reactores en lecho fluidizado", *Tecnología Química*, vol. XXIX, pp. 205-212, 2009.
- [42] X. Dai, X. Yin, Ch. Wu and W. Zhang, "Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor", *Proceedings of the ICE – Energy*, vol. 26, n.º 4, pp. 385-399, 2001.
- [43] J. I. Osayi, S. Iyuke, M. O. Daramola, P. Osifo, I. J. Van Der Walt and S. E. Ogbeide, "Pyrolytic conversion of used tyres to liquid fuel: characterization and effect of operating conditions", *Journal of Material Cycles*

and Waste Management, vol. 20, n.º 2, pp. 1273-1285, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0690-5>

- [44] E. Aylón, A. Fernández-Colino, M. V. Navarro, R. Murillo, T. García and A. M. Mastral, "Waste Tire Pyrolysis : Comparison between Fixed Bed Reactor and Moving Bed Reactor", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, pp. 4029-4033, 2008.
- [45] S. Galvagno, S. Casu, T. Casabianca, A. Calabrese and G. Cornacchia, "Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results", *Waste Manag.*, vol. 22, n.º 8, pp. 917-923, 2002.
- [46] H. Hu, Y. Fang, H. Liu, R. Yu, G. Luo, W. Liu, A. Li, and H. Yao, "Chemosphere the fate of sulfur during rapid pyrolysis of scrap tires", *Chemosphere*, vol. 97, pp. 102-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.037>
- [47] H. Aydına and C. İllıklıçb, "Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods", *Fuel*, vol. 102, pp. 605-612, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.067>
- [48] Y. Kar, "Catalytic pyrolysis of car tire waste using expanded perlite", *Waste Management*, vol. 31, n.º 8, pp. 1772-1782, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.005>
- [49] J. Shah, M. R. Jan and F. Mabood, "Catalytic Pyrolysis of Waste Tyre Rubber into Hydrocarbons Via Base Catalysts", *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 27, n.º 2, pp. 103-109, 2008.
- [50] M. Rofiquel Islam, H. Haniu and M. Rafiquel Alam Beg, "Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related properties", *Fuel*, vol. 87, nos. 13-14, pp. 3112-3122, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.036>
- [51] S. Chouaya, M. A. Abbassi, R. B. Younes and A. Zoulalian, "Scrap Tires Pyrolysis: Product Yields, Properties and Chemical Compositions of Pyrolytic Oil", *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 91, n.º 10, pp. 1603-1611, 2018. <https://doi.org/10.1134/S1070427218100063>
- [52] David, F. J. W. (2016). Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de Los Andes, 1-86.
- [53] Q. Xue, T. J. Heindel and R. O. Fox, "A CFD model for biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors", *Chemical Engineering Science*, vol. 66, n.º 11, pp. 2440-2452, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.010>
- [54] P. T. Williams, S. Besler and D. T. Taylor, "The pyrolysis of scrap automotive and heating rate on product composition", *Fuel*, vol. 69, n.º 12, pp. 1474-1482, 1990.