



**ANALISIS DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE  
COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

**Kellys Julieth Díaz Marimon**

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2022



**ANÁLISIS DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE  
COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

**Kellys Julieth Díaz Marimon**

**Proyecto de grado “monografía” presentado como requisito parcial para optar al título de:**

**Ingeniero Ambiental**

**Director (a):**

**Ing. Msc. Raúl Echeverry Barreto**

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL

BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2022



Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director de trabajo de grado

---

Firma del jurado

***Dedicatoria,***

*A Dios por permitirme por darme claridad y ponerme donde estoy hoy en día.*

*Dedico este trabajo de grado a mi madre, padre y hermanos por el apoyo incondicional durante toda mi etapa universitaria, Gracias por su amor, consejos, comprensión, estar en mis momentos más difíciles y nunca dejarme desfallecer. Me han dado todo lo que he necesitado hoy en día para ser una mujer con valores, principios, carácter, dedicación y sobre todo me enseñaron a nunca dejar de luchar por mis sueños y metas.*

*Como siempre les digo los amo con todo mi corazón.*

## **Agradecimientos**

Agradecimientos a todos los docentes de la Universidad en especial a los de la facultad de Ingeniería Ambiental y Civil, por todos los conocimientos brindados a lo largo de mi formación como Ingeniera Ambiental, gracias a sus enseñanzas y metodologías de estudio que me brindaron para la contribución de mi trabajo de grado.

Mis agradecimientos al Ingeniero Ambiental y director de trabajo de grado Raúl Echeverry por su, conocimiento, orientación y apoyo que me brindo en la realización de mi trabajo de grado, que sin duda deja un gran precedente en mi carrera universitaria y vida profesional.

## RESUMEN

La fabricación de plástico a nivel mundial se ha incrementado a lo largo de los años debido al gran uso de este material en muchos campos; su demanda constante ha resultado en un uso y disposición inadecuados de este recurso por falta de conocimiento y educación ambiental de la sociedad. Con el tiempo, esto ha tenido unas consecuencias negativas al medio ambiente, lo que ha provocado la extenuación de los recursos naturales no renovables como el petróleo y la contaminación de varios ecosistemas, principalmente medio ambiente acuático. Debido a que el plástico tiene un tiempo de degradación 100 a 1000 años, la alta demanda está provocando que el plástico se acumule en las zonas urbanas, causando problemas ambientales, sociales y de salud pública.

Existen diferentes métodos para hacer frente a los residuos plásticos, en esta monografía nos centraremos en el proceso de mitigación de este tipo de contaminación. Este procedimiento por el que se somete el plástico crea una mezcla de hidrocarburos llamada aceite ligero, utilizado anteriormente como fuente de energía. Este proceso se denomina pirólisis y se define en la descomposición térmica de moléculas grandes en ausencia de oxígeno, normalmente manejando temperaturas en un rango de 400 °C y 1000 °C, para formar fracciones utilizables de gas, líquido y sólido.

Los productos resultantes, como el etileno, el metano y el propileno, se reciclan o se utilizan como combustible en la industria petroquímica. Por lo tanto, el pirólisis catalítico tiene virtudes sobre el pirólisis térmico, como el poco gasto de energía y la generación de materiales plásticos con estrecha distribución del número de carbonos que pueden convertirse en aromáticos.

**Palabras clave:** pirólisis, pirólisis térmico, reciclado químico, polímero, desechos, residuos, reactor, volatilización, hidrocarburo.

## ABSTRACT

Plastic manufacturing worldwide has increased over the years due to the great use of this material in many fields; its constant demand has resulted in an inadequate use and disposal of this resource due to society's lack of knowledge and environmental education. Over time, this has had negative consequences for the environment, which has led to the depletion of non-renewable natural resources such as oil and the contamination of various ecosystems, mainly the aquatic environment.

Because plastic has a degradation time of 100 to 1,000 years, high demand is causing plastic to accumulate in urban areas, causing environmental, social, and public health problems.

There are different methods to deal with plastic waste, in this monograph we will focus on the mitigation process of this type of contamination. This procedure by which the plastic is subjected creates a mixture of hydrocarbons called light oil, previously used as an energy source. This process is called pyrolysis and is defined as the thermal decomposition of large molecules in the absence of oxygen, typically handling temperatures in the range of 400°C and 1000°C, to form usable gas, liquid, and solid fractions.

The resulting products, such as ethylene, methane, and propylene, are recycled or used as fuel in the petrochemical industry. Therefore, catalytic pyrolysis has advantages over thermal pyrolysis, such as low energy expenditure and the generation of plastic materials with a narrow carbon number distribution that can be converted into aromatics.

**Keywords:** pyrolysis, thermal pyrolysis, chemical recycling, polymer, waste, residues, reactor, volatilization, hydrocarbon.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo general .....	3
2.2 Objetivos especificos.....	3
<b>3. MARCO TEORICO.....</b>	<b>4</b>
3.1 Características de los plásticos.....	4
3.2 Manejo y tratamiento de los residuos plásticos .....	8
3.2.1 Conjunto de las 9 “R” .....	8
3.2.2 Economía Circular .....	9
3.3 Alternativas de manejo de residuos plásticos .....	11
3.3.1 Reciclado mecánico .....	12
3.3.2 Reciclado termo-químico .....	13
3.3.1 Reciclado Biológico .....	14
3.4 Pirolisis de plástico .....	14
<b>4. PLANTEAMIENTO PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>5. JUSTIFICACION .....</b>	<b>20</b>
<b>6. METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
7.1 Herramientas para la recolección de información .....	21
7.2 Selección de documentos y elaboración del estado del arte .....	21
7.3 Organización de las fuentes de información .....	22
<b>7. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>26</b>
8.1 Proceso pirolítico para PET, PEAD, PEBD, PP, y PVC .....	30
8.1.1 Pirolisis en PET .....	30

8.1.2 Pirolisis en PEAD .....	30
8.1.3 Pirolisis en PEBD .....	30
8.1.4 Pirolisis en PP .....	30
8.1.5 Pirolisis en PVC .....	31
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>32</b>

## Lista de figuras

Figura 1 Código de identificación universal de resinas plásticas .....	4
Figura 2 Jerarquía en el manejo integral de residuos .....	8
Figura 3 Esquema Economía Lineal ... ..	10
Figura 4 Esquema Economía Circular .....	10
Figura 5 Alternativas de tratamiento de los plásticos .....	12
Figura 6 Esquema de un proceso de pirolisis .....	18

## Lista de tablas

Tabla 1 Usos más comunes de los tipos de plásticos.....	5
Tabla 2 Adecuación de plásticos al proceso pirolítico.....	7
Tabla 3 ventajas y desventajas metodo de pirolisis .....	17
Tabla 4 Investigadores que estudiaron el proceso pirolítico.....	25

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayor problemática ambiental y sociales hoy en día es la sobreproducción de residuos plásticos debido al creciente consumo y al bajo costo de estos materiales, así como al aprovechamiento de estos residuos sin la finalidad adecuada de reducir su impacto para todos los ecosistemas. El tiempo de degradación de los plásticos es de entre 100 a 1000 años (Cantor & Cuta, 2021), por tanto, su alta demanda ha provocado la acumulación de materiales plásticos principalmente en las zonas urbanas, provocando afectaciones en los ecosistemas, en la población y a la salud donde se acumulan específicamente los residuos.

Para hacer frente a esta problemática medioambiental se propusieron varias metodologías y procesos de tratamiento a los residuos plásticos, como lo es el reciclado mecánico, que produce materias primas secundarias con similares o idénticas características físicas y químicas que el material original (Sáez, Universidad de Alicante, 2008). El reciclado térmico consiste en utilizar el plástico como combustible por alta capacidad calorífica, se suelen utilizar plásticos de diferentes composiciones y características, incluidos los contaminados o sucios (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) y reciclaje químico que implica la despolimerización en pirólisis y gasificación, los plásticos usados se descomponen en sus monómeros originales, todos compuestos gaseosos o componentes más simples como los hidrocarburos (Espinoza, 2009).

El proyecto se centra en investigar el método de pirólisis térmica con cada tipo de residuos plásticos. Este método pirolítico al cual se somete el plástico, da para obtener al final de su proceso, una fracción líquida de hidrocarburos, llamada aceite ligero y previamente ser aprovechada como fuente de energía.

Para la ejecución de esta tecnología se utilizan diferentes tipos de plásticos para la obtención de combustible, los cuales se clasifican por tipos de resinas plásticas: polietileno de tereftalato,

polipropileno, policloruro de Vinilo, polietileno de alta densidad, poliestireno y polietileno de baja densidad.

La pirólisis es la descomposición de la biomasa bajo la influencia del calor sin oxígeno, es decir, en una atmósfera completamente inerte (Daniel & Manuel, 2016), En este proceso, los materiales poliméricos se calientan a altas temperaturas, lo que hace que las estructuras moleculares grandes se descompongan en moléculas más pequeñas, produciendo una variedad de hidrocarburos líquidos y gaseosos que se utilizan como combustibles y fuente de energía (Cantor & Cuta, 2021).

Se realizó una revisión que investigó las tecnologías de pirólisis térmico y catalítica en la producción de combustible provenientes de desechos plásticos y cuál de los 6 tipos de plástico era más adecuado para una producción más sustentable evaluando en el proceso parámetros importantes como la temperatura de degradación, tiempo de degradación y fracción líquida de combustible obtenido luego de realizado todo el proceso degradación térmica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Efectuar una revisión sobre el proceso de la pirolisis térmica de residuos plásticos para la obtención de combustible.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Describir el proceso de obtención de combustible a partir de la pirolisis térmica de residuos plásticos.
- Evaluar las características positivas y negativas de las emisiones que se generan en el proceso de degradación térmica de los plásticos.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Características de los plásticos

Actualmente, el plástico se utiliza en diversas industrias según la necesidad, entre ellas se utiliza en envases, embalajes, materiales de construcción, repuestos, juguetes, etc. Según Plastics Association (PlasticsEurope, 2019) en los polímeros se utilizan materias primas derivadas del petróleo. Estos polímeros tienen diversos tipos de composiciones como, por ejemplo:

- Poliestireno (PS)
- Poliamidas (PA)
- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno tereftalato (PET)
- Polietileno de baja densidad (PEBD)
- Polietileno de alta densidad (PEAD)

En la Figura 1 se evidenciará su respectivo código y los tipos de plásticos



Figura 1 Código de identificación universal de resinas plásticas. Elaboración tomada de (Paz, 2016)

Tabla 1. Usos más comunes de los tipos de plástico.

CÓDIGO	ABREVIATURA	MATERIAL	USOS COMUNES
1	PET	Polietileno Tereftalato	Envases bebidas como gaseosas.
2	PEAD	Polietileno de alta densidad	Envases usados en agentes de limpieza, bolsas etc.
3	PVC	Policloruro de vinilo	Tuberías, juguetes, cables y cortinas
4	PEBD	Polietileno de baja densidad	Vinipel, cintas, Pañales.
5	PP	Polipropileno	Tapas, textiles, industria automotriz, etc.
6	PS	Poliestireno	Envases de un solo uso, cubiertos y vasos.
7	Otros	Plásticos no seleccionados	Varios.

Fuente: Elaboración tomada de (Espinoza, 2009)

A continuación, se desarrolla una breve descripción de los usos de cada uno de los tipos de plásticos:

- PET (Polietileno Tereftalato): Material reciclable, termoaislante, ligero, con resistencia física y químicamente, utilizado principalmente en la producción de botellas utilizadas en la industria de envasado de gaseosa, agua, aceite, alimentos y medicamentos (Sáez, Universidad de Alicante, 2008). El polietileno tereftalato que proviene del reciclaje se utiliza en la madera plástica, fibras textiles, piezas de automóviles y se puede reciclar en

nuevos envases para alimentos, es un plástico simple con moléculas de estireno. La temperatura de fabricación dentro de los 240 °C (Cantor & Cuta, 2021).

- PEAD (Polietileno de Alta Densidad): Material ligeramente flexible y fácilmente pigmentable, por ejemplo, en envases donde se almacena el aceite de motor, agentes de limpieza, shampoo, leche, baldes donde se almacena el helado y cajones plásticos de cerveza o gaseosas, entre otros (Paz, 2016).

Tiene excelente resistencia al calor, químicos y al impacto. Es un producto sólido, incoloro, translúcido y puede ser procesado en la formación de termoplásticos, como moldeo por inyección y extrusión. Su estructura tiene bajo contenido de oxígeno y heteroátomos como nitrógeno, azufre, y cloro (Torres, 2019).

- PVC (Policloruro de Vinilo): Material claro, muy resistente y duro adecuado para su uso con disolventes. Es ampliamente utilizado en cimentación: tuberías de agua, tuberías de drenaje, contornos de ventanas entre una serie de aplicaciones (Espinoza, 2009). El policloruro de vinilo debería ser eliminado de la categoría de combustible porque su combustión produce compuestos altamente peligrosos en la salud, animales y ecosistemas (organoclorados) (Sáez, Universidad de Alicante, 2008).

- PEBD (Polietileno de baja densidad): Material maleable y fuerte utilizado en sacos de supermercado, empaques de comida, papel higiénico, etc. La pirólisis de este tipo de plástico tiene gran potencial para obtener combustible que puede ser usado como fuente de energía debido a su gran número de cadenas de carbono y alto contenido de hidrocarburos aromáticos (López, 2020).

- PP (Polipropileno): Este tipo de plástico ampliamente utilizado en la fabricación de envases de alimentos por ejemplo avena, tapas de botellas, mesas y autopartes. Su gran punto de fusión permite recipientes que pueden encerrar líquidos y alimentos calientes (Espinoza, 2009). La pirólisis catalítica genera líquido con altos compuestos aromáticos (Suárez, 2019).

- PS (Poliestireno): Material espumoso plástico, que cuando expande es utilizado, en la industria en forma de tergopol (poliestireno expandido), aislaciones, relleno de empaques electrónicos, vasos de bebidas calientes, envases de comida rápida y bandejas de carne, su bajo punto de fusión logra derretirse en contacto con altas temperaturas (Paz, 2016).

Según lo anterior, podemos adecuar según el tipo de plástico cual es el más adecuado para realizar el proceso pirolítico, se puede observar en la tabla.

Tabla 2. Adecuación de plásticos al proceso pirolítico

RESINA	PUNTO DE FUSION (°C)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	ADECUACION PARA PIROLISIS	COMENTARIOS
Poliestireno (PS)	70 – 115	1.04 – 1.09	Excelentes propiedades de combustible	Temperaturas muy bajas requeridas en comparación a PP y PE Produce menos fracción líquida en comparación a PE y PP (Suárez, 2019).
Polietileno (PEAD ) (PEBD)	PEAD125 – 135 PEBD 110 – 120	PEAD 0.95 – 0.97 PEBD 0.91 – 0.94	Muy buena para pirolisis	Debido a la estructura de cadena ramificada, la temperatura requerida es de 500°C o superior. Durante la pirólisis, se transforma en cera, no en aceite líquido. Durante el pirólisis catalítico, se forma cera en la parte externa del catalizador y la cera se descompone como gas y líquido en la superficie interior del catalizador. Temperaturas altas requeridas en el proceso.
Polipropileno (PP)	160 – 170	0.91 – 0.92	Excelente	En la pirólisis catalítica que genera una buena rentabilidad del líquido con altos compuestos aromáticos (Suárez, 2019).
Policloruro de Vinilo (PVC)	150 – 200	1.16 – 1.45	No efectiva. muy pocas investigaciones fueron realizadas por varios científicos	Se obtiene gas peligroso (gas de cloro) Declaración cuando se somete a temperaturas bajas en un rango de 250°C y 320 °C o por adsorción química. En la pirólisis catalítica la degradación de coque y la existencia de cloro perjudican la función catalítica del catalizador.

Tereftalato de Polietileno (PET)	250 – 270	1.37 – 1.40	No adecuada	Contiene heteroátomos
---	-----------	-------------	-------------	-----------------------

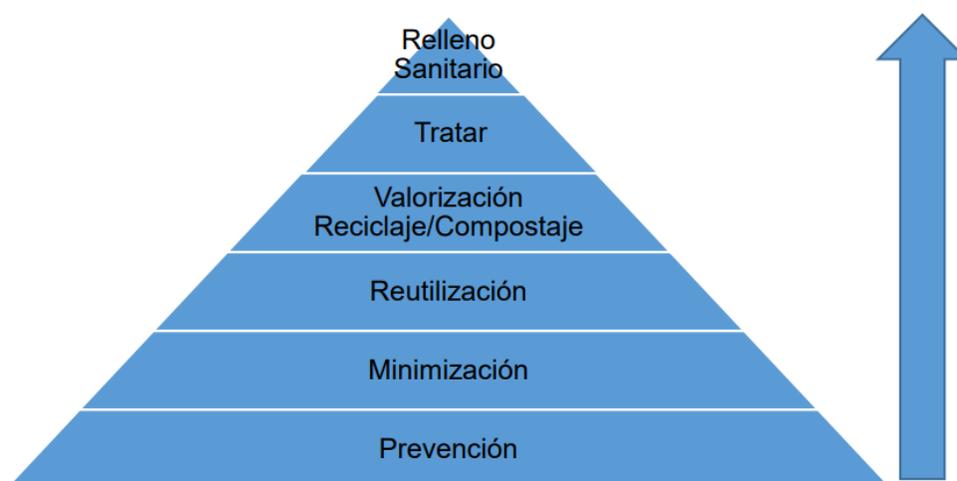
Fuente: (Suárez, 2019)

### 3.2 Manejo y tratamiento de los residuos plásticos

El manejo de desechos plásticos está compuesto por políticas y procedimientos en de un sistema de gestión ambiental económicamente apropiado que incluye diversos procesos y actividades como: producción, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final (Loaiza, 2012).

Para una buena gestión de los plásticos, se propone una jerarquía de acciones de gestión, priorizando las actividades de reducción de residuos, luego sugiriendo alternativas de uso del material y finalmente, si no se aplican otras acciones, debe desecharse adecuadamente(PlasticsEurope, 2019).

Figura 2. Jerarquía en el manejo integral de residuos.



Fuente: (Herrera, 2018)

### 3.2.1 Conjunto de las 9 “R”

Un proceso adecuado de tratamiento de desechos plásticos también se aborda en las 9 “R” (Repensar, Reutilizar, Reparar, Restaurar, Remanufacturar, Reducir, Reproponer, Reciclar y Recuperar) (Cantor & Cuta, 2021), esto de acuerdo con (Figuroa, 2021) en su artículo publicado en la edición verde del El Universal. A través de estos pasos, el gobierno promueve la invención y la creación de mérito en los métodos de fabricación y consumo a través de la optimización, reemplazo, reciclaje y regeneración de materiales, agua y energía (Figuroa, 2021). Hay es donde surgen nuevos conceptos como son responsabilidad social, sustentabilidad y desarrollo sostenible (Franco, 2021).

- **Reducción en la fuente:** En primer lugar para generar una buena gestión de residuos es un conjunto de acciones encaminadas a reducir el uso de plástico en la fabricación de productos, es decir, reducir la generación de residuos, manteniendo la eficiencia en la prestación de servicios (Sáez, Universidad de Alicante, 2008), (Elizabeth & Marisol, 2014).
- **Reutilización:** Una vez agrupados los desechos, el segundo paso es el reciclaje, esto garantiza que los residuos se utilicen para nuevos productos y actividades, prolongando el tiempo útil del material y reduciendo significativamente el consumo de materia prima. Diversas propiedades (durabilidad, lavabilidad, resistencia, esterilización, etc.) proporcionan a los desechos plásticos un material con características adecuadas para su reutilización (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) (Elizabeth & Marisol, 2014).
- **Reprocesar:** Esto hace referencia a los desechos que se generan a aun promoviendo la reducción y la adecuada reutilización. No obstante, también puede aprovecharse a través de las tres alternativas existentes a los residuos plásticos: el la valorización energética, reciclaje mecánico y el reciclaje químico(Sáez, Universidad de Alicante, 2008) (Elizabeth & Marisol, 2014).

### 3.2.2 Economía Circular (EC)

Una economía circular es un enfoque inclusivo, resiliente y renovable para sustituir el actual modelo económico lineal de comprar, usar y eliminar. Una economía circular asegura que los recursos siempre mantengan su valor, al mantener los ciclos biológicos y técnicos. Esto incluye un desarrollo activo continuo que mantiene y mejora el capital natural, optimiza el uso de los recursos y minimiza el riesgo sistémico mediante la gestión de reservas y flujos limitados, a esto se le llamaría un ciclo continuo (Foundation, 2017).

Figura 3. Esquema de la Economía Lineal



Fuente: (Cindy Bohorquez Escorcia, 2019)

Figura 4. Esquema de la Economía Circular



Fuente: (Cindy Bohorquez Escorcía, 2019)

La economía circular pretende alcanzar tres objetivos: la eficiencia energética, el uso de energías renovables y la gestión eficiente y responsable de todo tipo de recursos. Para lograr estos objetivos se han establecido tres principios básicos:

**Principio 1:** Conservar y adaptarse al capital natural controlando las reservas limitadas y equilibrando los flujos de recursos renovables, desmaterializando los suministros y asegurando beneficios cualitativos y virtuales donde sea adecuado. Cuando se adquieren recursos, los sistemas de reciclajes los elige adecuadamente, ya sea utilizando recursos renovables o eligiendo las tecnologías y procesos más eficientes posibles. La economía circular protege y adecua un capital natural al facilitar un "flujo de nutrientes" dentro del método y permitir la regeneración (Foundation, 2017) (Cindy Bohorquez Escorcía, 2019).

**Principio 2:** Optimizar el consumo de recursos mediante la circulación continua de materiales, productos y componentes con la mayor eficiencia durante los ciclos biológicos y técnicos. Es decir que se busca diseñar procesos de fabricación, reparación y reciclaje puedan repetirse para que los materiales puedan reutilizarse y seguir cooperando a la economía (Cindy Bohorquez Escorcía, 2019) (Foundation, 2017).

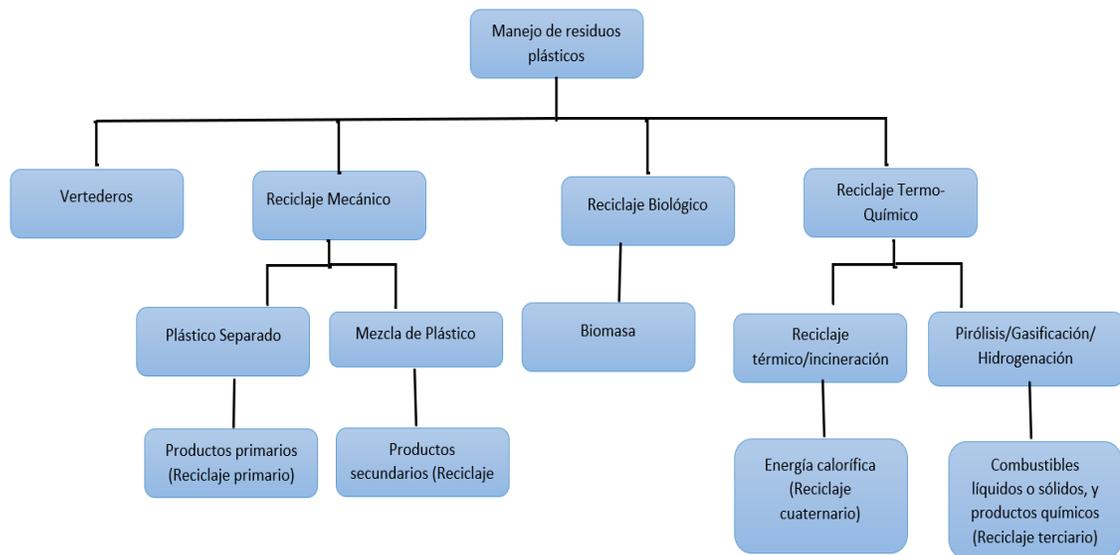
**Principio 3:** Mejorar la eficacia del método detectando y eliminando las externalidades del diseño. Esto incluye evitar o al menos reducir el daño potencial en áreas como la alimentación, el transporte, la educación, la salud y la recreación y controlar adecuadamente las externalidades importantes como el uso de la tierra, la contaminación del aire y el agua o los vertidos de sustancias tóxicas (Cindy Bohorquez Escorcía, 2019) (Foundation, 2017).

### 3.3 Alternativas de manejo de residuos plásticos

El plástico, por su composición y origen del petróleo, es una materia prima en agotamiento, un desecho de alto valor, relativamente fácil de reciclar y en grandes cantidades. La variedad de materiales plásticos con diferentes composiciones debe dividirse en varias categorías antes de que puedan reciclarse. Se han propuesto varias alternativas, incluido el reciclaje mecánico, el aprovechamiento energético y el reciclaje químico, incluida la despolimerización, la gasificación y la pirólisis. De estos, la pirólisis tiene la mayor ventaja sobre el procesamiento mecánico, lo que permite que diferentes tipos de plásticos ingresen al proceso sin caracterización, e incluso permite la separación de residuos plásticos, lo que coincide con el aprovechamiento de energía por energía para diferentes procesos (Elizabeth & Marisol, 2014).

La figura 2 muestra las alternativas del manejo que se dan actualmente para el tratamiento de residuos plásticos.

Figura 5. Alternativas de tratamiento de los plásticos.



Fuente: (Rojas, 2016)

### 3.3.1 Reciclado mecánico

Consiste en la manipulación de residuos plásticos ejerciendo una presión y aplicando temperaturas altas para transformarlos en otros productos similares o diferentes al original. El método de reciclaje mecánico da inicio con la recolección y clasificación, el objetivo es identificar residuos clasificados según las características de los materiales plásticos, fáciles de manipular y disponibles en grandes cantidades. El siguiente paso es cortar en pequeños tamaños o triturar, luego se procede a lavar el producto para eliminar impurezas y agentes contaminantes, el segundo paso es centrifugar el material y secarlo, tercer paso homogenizar para garantizar una calidad constante y adecuada (Sáez, 2008).

### 3.3.2 Reciclado termo-químico

Este proceso de reciclaje descompone químicamente los desechos plásticos en elementos más simples, como gas de síntesis, monómeros de partida e hidrocarburos (José M Arandes, 2004). Sus propiedades hacen que su aplicación sea aplicable tanto a combinaciones de diferentes polímeros evitando una segregación por tipo, como por

ejemplo polímeros termorrígidos, por lo que lo hace un adecuado complemento para el reciclaje mecánico. El procedimiento termolítico, caracterizado por la degradación de plásticos, es necesario para romper la cadena polimérica, y el proceso tiene mayor flexibilidad, requiriendo rangos temperaturas altas para producir pirólisis y gasificación, así como las técnicas de refinería (Maria Paula Mesa Upegui, 2016).

El plástico posee largas cadenas de polímeros que se descomponen bajo la influencia del calor para formar compuestos de cadena más corta, generalmente en forma líquida y gaseosa. Los plásticos son sustancias de alto peso molecular que no se pueden purificar mediante procesos como la destilación, la extracción o la cristalización, y solo se pueden utilizar descomponiendo moléculas grandes en piezas más pequeñas. (Maria Paula Mesa Upegui, 2016). La pirólisis descompone moléculas grandes en otras más pequeñas y también puede usarse para transformar mezcla de sustancia de desechos plásticos en combustibles y sustancias similares que pueden generar energía. Como resultado de la descomposición de los compuestos a base de carbono restantes, se forma una mezcla de gases, hidrocarburos condensables y residuos que contienen carbono o carbón (coque) (Maria Paula Mesa Upegui, 2016).

Otra de las tecnologías que utiliza residuos plásticos para producir combustible es la valorización energética, por su alto valor energético; es decir, si 1 kilogramo de polietileno (tiene el valor energético aproximadamente de 46 MJ/kg) (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) genera similar energía que 1 kilogramo de fracción de petróleo o gas natural. Muchas investigaciones y análisis del equilibrio ecológico han comprobado que la restauración de energía se considera más conveniente y más respetuosa con el medio ambiente que el reciclaje mecánico o químico (Sáez, Universidad de Alicante, 2008). Esta alternativa es particularmente útil para residuos dañados o contaminados, como algunos plásticos agrícolas o algunos residuos sólidos urbanos (Elizabeth & Marisol, 2014).

### **3.3.3 Reciclado Biológico**

El reciclaje biológico incluye todos los procesos que utilizan la actividad microbiana y las moléculas producidas por microorganismos para convertir los desechos plásticos en recursos renovables como el compost y el biogás (Arael Alfonso Cardero, 2020).

El reciclaje biológico es el resultado de investigaciones científicas destinadas a desarrollar materiales plásticos biodegradables. Sin embargo, algunos se biodegradan solo bajo ciertas condiciones, como la exposición a la luz, ya que tardan en descomponerse y volver al ciclo del carbono si simplemente se depositaran en vertederos. También producen gases de efecto invernadero durante la descomposición, y cuando se trata de una mezcla de plásticos biodegradables y no biodegradables, el tiempo de descomposición aumenta. Este tipo de plástico biodegradable se utiliza principalmente en la industria alimentaria (Rojas, 2016).

### **3.4 Pirolisis de plástico**

El proceso de pirólisis implica la degradación térmica de macromoléculas en un ambiente ausente de oxígeno con rangos de temperaturas que oscilan de los 400 °C a los 1000 °C produciendo fracciones gaseosas, líquidas y sólidas utilizables. Las fracciones líquidas obtenidas como son metano, el etileno, el propileno o el benceno, se puede reciclar o utilizar como combustible en la industria petroquímica (Sáez, Universidad de Alicante, 2008).

Por lo tanto, la pirólisis catalítica tiene muchas ventajas sobre la pirólisis térmica. Por ejemplo, reducción del consumo energético y producción de materiales con estrecha distribución del número de carbonos en los hidrocarburos aromáticos (Caleño, 2020). La pirólisis consume una gran cantidad de energía en relación con la pirólisis catalítica por la baja conductividad térmica del polímero y al aumento de calor durante el proceso de descomposición. Por ello, se implementaron tecnologías catalíticas que incentivan la descomposición a muy bajas temperaturas y así mismo reducir el consumo de energía (Caleño, 2020).

En la pirolisis térmica cuando los residuos plásticos se calientan, se libera energía. Debido al alto poder calorífico del plástico, se utiliza como combustible en varios procesos. Aquí se pueden utilizar todos los tipos de plástico, incluidos aquellos con daños visibles o suciedad, por ejemplo, envases provenientes del uso agrícola o bien sea desechos sólidos urbanos. Esta metodología pirolítica se considera más respetuoso con el medio ambiente que el reciclaje químico o mecánico (Elizabeth & Marisol, 2014).

Existen dos categorías principales de residuos plásticos: los desechos de producción y conversión y los desechos de post-consumo (Sáez, Universidad de Alicante, 2008). Los desechos de producción y conversión incluyen diferentes residuos de plantas de producción de polímeros y fábricas que los convierten en productos plásticos (Daniel & Manuel, 2016) Aproximadamente el 35% de los desechos de post-consumo provienen de los sectores industriales, construcción, automotriz, industrial, electrónico y agrícola, mientras que el 65% faltante es obtenido de los residuos sólidos urbanos (Diaz & Zagarra, 2019).

Alrededor de 170 millones de toneladas de plástico se consumen en todo el planeta, el 77% en masa proviene de termoplásticos, polietileno de baja y alta densidad polipropileno, policloruro de vinilo y tereftalato de polietileno, en el 23% están los termoestables, encontrando en primer lugar las resinas epóxicas y poliuretano (PU) (Torres, 2019).

En Colombia, el consumo per cápita de plásticos ronda los 24 kg, lo que corresponde a 1.250.000 toneladas anualmente. En el país se producen aproximadamente 12 millones de toneladas entre desechos sólidos urbanos, cuya tasa el reciclaje es sólo el 16%. Para Bogotá, se fabrican alrededor de 7.500 toneladas diarias, de las cuales se aprovechan entre un 14% y un 15%, incluso menos que otras ciudades. El 74% de envases en Colombia llegan al relleno sanitario (Diaz & Zagarra, 2019).

En los últimos años, este proceso ha sido investigado y desarrollado en residuos sólidos urbanos. El punto inicial es que los plásticos son extensas cadenas poliméricas que se

descomponen bajo la influencia del calor para producir compuestos de cadena más corta que puedan utilizarse como materia prima para otros procesos químicos (Caleño, 2020). Se define la pirólisis como la degradación térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y, dependiendo de las condiciones de alimentación y proceso, en particular del tipo de plástico utilizado, se puede obtener productos como lo son los gases, hidrocarburos condensables y residuos carbonosos (Castells, 2005). Los gases obtenidos de este proceso se someten a un enfriamiento y seguidamente pasan a hacer purificados, mientras que las fracciones de líquido condensable se pueden utilizar como combustible o materia prima (Rojas, 2016).

Un estudio realizado por (Castells, 2005) demostró que, las dioxinas y furanos (sustancias altamente contaminantes), se deshacen si los gases producidos se someten a un proceso de oxidación a altas temperaturas queden estar o sobrepasar los 1200 °C y un tiempo de operación que supere los dos segundos, generando como residuo finales de este proceso sólo CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Según (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) el diseño de la cámara de combustión está optimizado para garantizar una temperatura considerablemente alta (>750 °C) y generar una agitación a los gases para generar contacto efectivo con el oxígeno. De esta manera no se formarían productos de incompleta combustión que dan oportunidad a la creación de las dioxinas y furanos.

Otro método que plantea (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) es adicionar o inyectar NH<sub>3</sub> en la parte final de la instalación en un rango de temperaturas que va desde los 200°C y los 300°C, adicionando un catalizador sólido de óxidos metálicos (TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, WO<sub>3</sub>) para así hacer reaccionar los gases. La eficiencia es mayor y el catalizador también destruye eficazmente las dioxinas, pero el costo es mayor y es necesario asegurarse de que el gas esté libre de metales pesados cuando llegue al catalizador.

Tabla 3. ventajas y desventajas método de pirólisis.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Método reciclaje	Poca optimización del proceso
Solución de alta tecnología	Falta de análisis en producción de gases del proceso de incineración
Reducción de los vertidos RSU (Residuos Sólidos Urbanos)	Tecnología relativamente poco experimentada
Obtención de biocombustible	Alto costo de inversión
Se maneja todo tipo de plástico	
Facilidad de manejo de los productos finales	

Fuente: (Castells, 2005)

Los tres componentes principales resultantes de la pirólisis son:

- La corriente de gas, que normalmente contiene gases como dióxido, hidrógeno, monóxido de carbono y metano, depende de las propiedades orgánicas de los materiales de la pirólisis y los requisitos de funcionamiento.
- La fracción líquida con temperatura ambiente, que consiste en aceites o brea líquida que incluyen productos químicos como acetona, metanol y ácido acético.
- Residuos de coque (carbono) incorporado con el material inerte que entra al proceso.

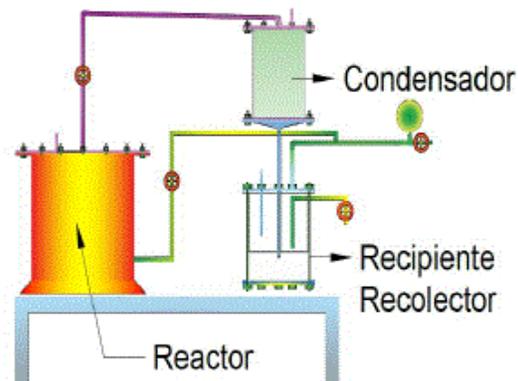
El pirólisis se realiza en una amplia gama de variaciones de tiempos de operación, temperatura, presiones, en ausencia o presencia de líquidos reactivos, gases y catalizadores. Los rangos de temperatura pueden darse desde:

- Alta > 600 °C
- Media entre 400 °C a 600 °C
- Baja < 400 °C

La presión que se genera en este proceso es atmosférica.

En la Figura 6 se puede observar el esquema de un proceso de pirólisis.

Figura 6. Esquema de un proceso de pirólisis



Fuente: (Proaño & Crespo, 2009)

Pirólisis térmico: Este es un método con una reacción endotérmica de alta energía que necesita temperaturas que estén entre los 350°C a 650°C, según el tipo de plástico que sea sometido a esta degradación térmica. Otros procesos requieren temperaturas bastante altas que pueden ser de hasta 900°C para lograr unos rendimientos del producto aceptables. Las investigaciones realizadas sobre el tratamiento térmico primario se centró en polietileno, poliestireno, polipropileno, de origen primario y proveniente de residuos, la degradación térmica de estos polímeros produce hidrocarburos de alto peso molecular y carbono o coque, que se pueden presentar en diversas cantidades dependiendo del material (María Paula Mesa Upegui, 2016).

Debido a todo este proceso de pirólisis se determinó que una fuente alternativa de energía es el seguimiento de todas aquellas energías limpias que son producidas naturalmente, seleccionando lugares específicos geográficamente donde soliciten están alternativas de energía y que sea de utilidad para la población (Cabello, 2006).

Dicho lo anterior se identifica que la pirólisis es una fuente renovable de energía ya que, en un determinado período de tiempo, vuelve a ser útil en una cuantía igual o idéntica a la que se ha consumido; el período de tiempo es corto con una organización de magnitud a escala humana. Esto depende del consumo de energía que se consuma por unidad de tiempo (Cabello, 2006).

#### **4. PLANTEAMIENTO PROBLEMA**

Los plásticos son uno de los mayores contribuyentes al desarrollo social, económico y tecnológico. Su versatilidad, durabilidad, flexibilidad y otras propiedades le otorgan una amplia gama de usos que pueden aplicarse a casi todos los sectores de la sociedad actual (Maria Paula Mesa Upegui, 2016).

El primordial problema que esta en el medio ambiente y social, es el crecimiento del consumo y los pequeños costos de fabricación de los materiales plásticos, por lo tanto, no se realiza un adecuado aprovechamiento de los desechos plásticos que ayuden minimizar el impacto que generan actualmente a los ecosistemas y al medio ambiente. El plástico tipo de material que por los aditivos que se le adicionan les da una característica de durabilidad, lo que hace que este material se degrade en un periodo de tiempo entre 100 años a 1000 años, por lo que su consumo desmedido ha generado la acumulación de materiales plásticos en gran parte de la zona urbana, provocando serias consecuencias medioambientales, comunitarios y de salud pública donde se agrupan estos residuos.

En Bogotá el 60% de los desechos diarios son residuos plásticos, Silvia Gómez, directora de Greenpeace Colombia, dice que uno de los residuos más importante en nuestros desechos es el plástico. Solo en 2018, la fabricación de este material aumentó 2,5%, equivale a 60 mil toneladas de bolsas de plásticas, 2 mil toneladas de pitillos y 23 mil toneladas de tapas de plástico (Diana, 2022).

La revisión esta en caminado al estudio de las referencias bibliográficas y en probar la viabilidad del proceso de pirólisis plástica con los tipos diferentes de plástico, que consiste en la descomposición térmica. Este proceso, por el que pasan los plásticos genera una fracción líquida de combustible, que puede ser aprovechada como fuente de energía por ejemplo en equipos agrícolas.

#### **5. JUSTIFICACION**

La mayoría de los productos de consumo ahora están empacados en varios tipos de plástico. Algunos de estos se reciclan en polímeros de baja calidad con otros tipos de usos y reutilización, pero el 80% de los desechos plásticos terminan en vertederos (rellenos sanitarios) (Suárez, 2019).

Los residuos plásticos son un problema global debido a su persistencia en el medio ambiente. Como tal la pirolisis es un método que se ha propuesto como una posible solución de tratamiento y aprovechamiento. De este método se puede obtener y recolectar una fracción líquida aprovechable que poseen las características y estructura compatible a la de los compuestos del petróleo, por lo que pueden ser utilizados como combustibles alternativos o utilizados en la industria petroquímica.

Se han implementado una cantidad de estrategias para disminuir la producción excesiva de plásticos y así generar un menor impacto ambiental, por lo que hoy en día se buscan nuevas tecnologías que permitan frenar y reducir residuos no amigables con el medio ambiente.

En este proyecto se busca comprender y evaluar la viabilidad del funcionamiento del método de pirolisis de plástico para la obtener combustible, analizando cada tipo de plásticos presentes en el mercado y escogiendo el más idóneo para el proceso, que no genere contaminantes adicionales en su proceso de incineración y el combustible obtenido de este sea el más óptimo para ser utilizado en vehículos, podadoras, cuatrimotos, entre otros.

Los residuos plásticos se pueden procesar mediante el método de reciclaje mecánico y químico, por lo tanto, esta revisión de referentes bibliográficos con énfasis en pirolisis térmica y catalítica, con el propósito de producir materiales aprovechables, como combustibles, a su vez evaluar qué tipo de plástico es el más idóneo en su proceso térmico que no genere emisiones contaminantes.

## **6. METODOLOGIA**

En esta monografía se utilizó una metodología que permite analizar varios casos de estudio y se toma de ello lo que mejor se adapte integrándolo así con más formas de pensamiento para generar

una sola idea, se hace una revisión bibliográfica principalmente de artículos académicos e información relevante de revistas científicas.

Se realiza una breve descripción de los parámetros que permiten el desarrollo correcto de esta monografía.

### **6.1 Herramientas para la recolección de información**

Para la revisión y compilación bibliográfica se tomó cuenta que la información procesada en este documento este lo más actualizada y cubra la gran mayoría de estudios del pirólisis térmico generando propuestas que satisfaga las necesidades existentes.

Para realizar una acertada investigación se recurre a fuentes de información primarias, como lo son los las referencias bibliográficas, estos se obtuvieron por medio biblioteca de la Universidad Antonio Nariño, y de buscadores como Redalyc, Scielo y Sciencedirect. También se buscó por Google académico artículos como tesis doctorales, proyectos de grado, investigaciones. Donde se detallaron alrededor de 40 artículos y se seleccionaron los más acordes al tema tratado, en este caso se centró la investigación en artículos que brindaran información sobre el tipo de plástico más adecuado para el proceso pirolítico y el análisis de los gases producidos por cada uno de ellos.

### **6.2 Selección de documentos y la elaboración del estado del arte**

Para la selección de los documentos se fijaron temas con relevancia en análisis de la degradación térmica de cada uno de los tipos de plásticos en atmósfera inerte como en atmósfera oxidativa, se tuvo en cuenta el análisis de la producción de gases para seleccionar el plástico que mejor fracción líquida de combustible se obtenía y que menor riesgo generara de contaminantes como dioxinas y furanos. Esto es para evaluar el potencial de recuperación de residuos plásticos a través de la conversión termoquímica.

Se escogieron los documentos y artículos según su año de publicación, metodología, análisis de resultados y conclusiones.

### 6.3 Organización de las fuentes de información

En la tabla 4 se organiza la información obtenida donde se especifica autor del documento, fecha de edición, lugar donde se realizó la investigación y el tema central relacionado a la viabilidad del proceso pirolítico.

Tabla 4. Investigadores que estudiaron el proceso pirolítico.

PAIS	AUTOR	TITULO	DESCRIPCION
España	María del Remedio Hernández Férez	Evaluación de la Pirólisis Térmica y Catalítica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Técnica de Reciclado. Influencia de las Variables sobre los Productos Generados.	El craqueo de los hidrocarburos pesados aumenta su rendimiento, ya que existe una relación entre los hidrocarburos ligeros y pesados producidos con el aumento del tiempo de operación durante la pirólisis. Durante la pirólisis catalítica, esta correlación es menos obvia, pero es posible analizar la dependencia específica de los hidrocarburos gaseosos producidos por el tiempo de operación, al igual que con las condiciones térmicas (Férez, 2007).
	Maria Paula Mesa Upegui	Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de Diesel a nivel	Se detallaron variables que alteran al proceso directamente, la variable temperatura da mayor influencia. Con 650 °C da un rendimiento mejor del producto que se deseado (aceite de pirólisis). Por otro lado, la presencia del catalizador no cambió

Colombia	Carol Ivonne Ortiz Rodríguez	laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos	significativamente la distribución del producto final, especialmente las fracciones líquida y gaseosa. Estos factores están determinados por el análisis de varianza que intenta establecer las condiciones operativas óptimas para lograr el mejor rendimiento (Maria Paula Mesa Upegui, 2016).
Ecuador	Johanna Elizabeth Espinoza Merchán Tania Marisol Naranjo Cabrera	Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante el pirólisis de residuos plásticos generados en la universidad politécnica salesiana.	Se ha determinado que la temperatura óptima para el pirólisis de desechos plásticos es de 400°C. Esto se debe a que la degradación térmica no se desarrolla completamente a temperaturas inferiores a 300°C (Elizabeth & Marisol, 2014).
España	Xavier Elías Castells	Tratamiento y valorización energética de residuos	Afirmaron que las dioxinas y furanos (contaminantes pesados) se descomponen cuando el gas producido se oxida a mayores temperaturas, es decir a 1200°C y tiempos de operación del reactor mayores a los dos segundos, se destruirán los gases, teniendo como productos de salida de este proceso sólo H <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub> (Castells, 2005).
Ecuador	Ignacio Aracil Sáez	Formación de contaminantes y Estudio Cinético de la Pirólisis y	A mayor temperatura durante la pirólisis, las reacciones endotérmicas, síntesis y la descomposición molecular favorecen la producción de elementos más estables térmicamente. El proceso de craqueo implica la eliminación de hidrocarburos

		Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP).	alifáticos volátiles, que se producen como principal producto de pirólisis. (Sáez, Universidad de Alicante, 2008).
Malasia	Wong SyieLuing	Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review	Este estudio proporciona una descripción completa del avance de la pirólisis plástica, que continuara siendo un área de estudio de investigación importante para ingenieros y químicos en próximos años y una herramienta poderosa para la gestión ambiental (Wong SyieLuing, 2021).
E.E.U. U	Mehrdad SeifaliAbbas-Abad Mehdi Nekoomanesh Haghighi	Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products	La adición de un catalizador ha mejorado la económica del proceso de la producción de hidrocarburos ligeros. La pirólisis de PP mostró los rendimientos máximos de producto condensado a 450 °C y 10% de catalizador, respectivamente. El hidrógeno como gas portador reactivo aumentó el rendimiento del producto condensado y parafínico. Los resultados mostraron que los gases portadores reactivos pueden afectar patentemente el rendimiento y la composición del producto (Mehrdad SeifaliAbbas-Abad, 2014).
Taiwan	Y.-H. LinM. H. Yang	Chemical catalysed recycling of waste polymers: Catalytic conversion of polypropylene into fuels and chemicals over spent	Los experimentos llevados a cabo con el catalizador FCC-s1 Buen rendimiento de hidrocarburos volátiles con diferentes selectividades en el producto final dependiendo de las condiciones de reacción. Sin embargo, la silicalita proporciona conversiones

---

FCC catalyst in a fluidised-bed reactor

muy bajas de residuos de polímeros en hidrocarburos volátiles en comparación con el catalizador FCC gastado (FCC-s1) en las mismas condiciones de reacción. La selectividad también puede ver afectada por cambios en las condiciones de operación; en particular, las olefinas e iso-olefinas se producen a temperaturas bajas y tiempos cortos de contacto. (Y.-H. Lin, 2007).

---

Fuente: Propia

## 7. ESTADO DEL ARTE

Los residuos de polímeros son ahora un constituyente importante de los desechos urbanos en varias capitales del mundo. Este producto tiene lugar importante en la economía, sustituyendo a productos como la madera, y también se utiliza como material de embalaje y transporte por sus excelentes características y baja densidad.

La producción de combustible líquido proveniente de desechos plásticos por medio de pirólisis ofrece una excelente solución y es una nueva tecnología que permite aprovechar las grandes cantidades de desechos plásticos que no pueden valorizarse con los procesos convencionales de reciclaje mecánico y acaban en rellenos sanitarios.

Una revisión bibliográfica de la pirólisis evaluó su desempeño en la fabricación de combustibles con otros tipos de plásticos. Las condiciones operativas óptimas para la pirólisis catalítica y térmica se establecieron mediante el análisis de las técnicas existentes.

En España se llevaron a cabo algunos experimentos con pirólisis y se encontró que temperaturas más altas conducen a que se formen compuestos termicamente más estables. Según estudio realizado por (Sáez, Universidad de Alicante, 2008), altos niveles de oxígeno en combinación con altas temperaturas son efectivos eliminando hidrocarburos aromáticos, alifáticos y parcialmente

oxigenados.

(Sáez, Universidad de Alicante, 2008) propone un proceso de pseudorreacción global que degrada térmicamente el cloruro de polivinilo en medios inertes y oxidantes. Cada reacción es un modelo que involucra una serie de reacciones y no tiene en cuenta el mecanismo de descomposición térmica detallado del producto, pero estos procesos tienen la ventaja de la simplicidad en comparación con otros, y se ha realizado una dinámica más compleja (Sáez, Universidad de Alicante, 2008). En cualquier caso, estos patrones de similitud resultantes se centran en la evidencia de los experimentos realizados con las diversas técnicas analíticas utilizadas, como el análisis termogravimétrico, el estudio diferencial térmico y espectrometría de masas (Katheribe & Cristina, 2018).

Por lo que se logró concluir en el estudio realizado por (Sáez, Universidad de Alicante, 2008) que la incineración térmica del polietileno en una atmósfera sin presencia de oxígeno arranca con temperaturas superiores a 300°C y ocurre en una primera etapa que no forma un desecho sólido final. La conducta en un ambiente oxidante es variable, ya que se observan mayores tasas de degradación del material y procesos irregulares con pérdida de masa de la muestra.

De igual manera, en Ecuador, se realizó un proyecto en la Universidad Politécnica Salesiana donde se recolectaron en la misma universidad desechos plásticos de mayor generación como lo fue el caso del Polietileno tereftalato, Polietileno de Alta Densidad y Poliestireno, estos residuos previamente fueron enjuagados, secados y triturados para así pasarlos a un reactor de pirolisis tipo semi-batch de 1 litro de capacidad, de calentamiento eléctrico, al pirolizar los residuos a una temperatura de 400 °C se obtuvo un rendimiento de fracción líquida de combustible para el poliestireno de 68.54%; seguido del polietileno de alta densidad con 47.19% y de último el Polietileno tereftalato bajo porcentaje de 2.13%. Por lo tanto, los residuos plásticos formados por poliestireno producen la mayor fracción líquida y pueden utilizarse como combustible o materia prima según (Myriam Mancheno, 2016). Por lo tanto, los residuos plásticos formados por poliestireno producen la mayor fracción líquida y pueden utilizarse como combustible o materia prima según (Myriam Mancheno, 2016).

Según (Myriam Mancheno, 2016) los fragmentos recolectados de la pirólisis de desechos plásticos de polietileno de alta densidad y poliestireno mediante cromatografía de gases contienen hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), que forman parte de los combustibles y aceites.

En Ecuador (Proaño & Crespo, 2009) realizaron experimentos donde utilizaron polietileno de alta densidad para obtener fracciones de pirólisis (sólido, líquido y gas) a temperaturas entre 250 °C y 300 °C, se pirolizó y no se obtuvo un producto líquido. Además de variable temperatura, el tiempo total de reacción afecta el rendimiento de producto (sólido, gas y líquido) obtenido. A una temperatura de 400 °C y un tiempo de reacción de 30 min domina cuantitativamente la parte sólida, mientras que a la misma temperatura con un tiempo de reacción de 1 h y 2 h domina la parte líquida, y los parámetros óptimos son 400 °C y 2 horas, que es donde se logra producir la mayor cantidad de fracción líquida representada en un porcentaje de 76,72% (Proaño & Crespo, 2009). La destilación con una temperatura de 200°C, el rendimiento global del método de pirólisis de polietileno fue de 32,64%, resultando en combustible líquido (Caleño, 2020).

En Taiwán (Y.-H. Lin, 2007) catalizó una descomposición térmica de residuos plásticos de polipropileno con un catalizador gastado de FCC, usando un reactor de lecho fluidizado de laboratorio operado isotérmicamente a presión atmosférica. Se investigaron los efectos de las condiciones de reacción, incluidos el catalizador, la relación catalizador/material y la temperatura, y el caudal de gas licuado. Las condiciones de operación fueron una temperatura de 300°C, un tiempo de residencia de 30 minutos y una relación catalizador/alimentación del 30%. La eficiencia del producto líquido es del 60 %. La selección puede afectarse por cambios en las condiciones de reacción. En este estudio se producen hidrocarburos entre olefinas e isoolefinas (Y.-H. Lin, 2007).

En Colombia en la Universidad del Norte en Barranquilla (Sebastian Amar Gil, 2019) se comparan dos modelos Aspen Plus para simular el proceso de pirólisis para la producción de combustible líquido a partir de diferentes tipos de residuos plásticos. El modelo se basa en mecanismos de reacción cinética y minimización de la energía libre de Gibbs. La simulación muestran que materiales como el polietileno de alta densidad promueven la formación de

combustibles líquidos y materiales como el polietileno de tereftalato promueven la formación de productos gaseosos. Usando el modelo propuesto, es relativamente fácil evaluar e investigar las condiciones de operación y las propiedades de la materia prima para optimizar la adquisición de una de ellas. Por tanto, el modelo propuesto representa una herramienta computacional completa y útil para estudiar el potencial de valorización de residuos plásticos mediante conversión termoquímica (Sebastian Amar Gil, 2019).

## **7.1 Pirolisis térmica y Catalítica**

### **7.1.1 Pirólisis térmico**

La técnica de pirólisis se forma con el cambio de temperatura de los residuos plásticos sometidos a determinadas condiciones atmosféricas inertes. Durante esta metodología se utilizan temperaturas entre 350°C y 900°C (Caleño, 2020).

### **7.1.2 Pirólisis catalítico**

En este tipo de pirólisis, la reacción de conversión se realiza a baja temperatura y en poco tiempo debido a la existencia del catalizador que facilita la metodología. El pirólisis catalítico tiene varias virtudes sobre el pirólisis térmico, como un leve gasto de energía y la creación de materiales de distribución más estrecha (Caleño, 2020).

## **7.2 Proceso pirolítico para PET, PEAD, PEBD, PP, PS y PVC**

El proceso de pirolisis tiene un comportamiento diferente para cada uno de los 6 tipos de plásticos que se describe a continuación:

### **7.2.1 Pirolisis en Polietileno Tereftalato (PET)**

El Polietileno tereftalato, no genera una buena fracción líquida, formando gran porción de fracción sólida, que según los datos bibliográficos, puede ser utilizada como carbón activado (Quiroga, 2020).

Por lo tanto, método de pirolisis térmica este material de plástico no se suele utilizar para obtener combustible.

### **7.2.2 Pirolisis en Polietileno de alta densidad (PEAD)**

Las literaturas indican que los productos líquidos obtenidos como resultado de la pirólisis pueden convertirse en combustibles con propiedades semejantes a la gasolina y diésel que son los combustibles convencionales. Las evaluaciones ambientales indicaron que el nivel de impacto durante las pruebas fue muy bajo. En resumen, se puede decir que el método de pirólisis simple convierte el HDPE en productos de hidrocarburos líquidos con un rendimiento del 68 % (Caleño, 2020). El método es altamente dependiente de la temperatura, por lo que es la variable más representativa de la conversión de polímeros.

### **7.2.3 Pirolisis en Polietileno de baja densidad (PEBD)**

En estudios realizados por los autores (Paul T Williams, 1999) y (JingxuanYangabJenny, 2016) los rendimientos más altos de combustibles líquidos obtenidos de la pirólisis de PEBD se encontraron a 550°C y 600°C, respectivamente. En ambos estudios, la eficiencia del combustible líquido disminuyó si la temperatura del proceso de operación fue 50°C más alta que la temperatura óptima.

### **7.2.4 Pirolisis en Polipropileno (PP)**

La descomposición completa del PP empieza a partir de los 400°C. (Azubuike Francis Anene, 2018) y (Y.-H. Lin, 2007) muestran que la pirólisis del PP produce altas concentraciones de hidrocarburos en el rango de la gasolina. Esto se debe a que los aceites están compuestos principalmente de olefinas. Donde se encontraron porcentajes más altos de hidrocarburos Diesel, esto podría explicarse por la naturaleza del aceite, que era de naturaleza más parafínica según la gravedad API.

### **7.2.5 Pirolisis en Policloruro de vinilo (PVC)**

La presencia de PVC durante la combustión afecta directamente la cantidad de cloro en el humo, el cual debe ser neutralizado a menos que el HCl sea reutilizado con tecnología especial, afectando así la eficiencia requerida para el tratamiento del gas. (Xavier Elías Castells, 2012).

El impacto potencial de la degradación térmica de desechos de PVC en las formaciones de dioxinas es objeto de debates científicos. Algunos estudios sugieren que la reducción del cloro en los incineradores puede ayudar a reducir la producción de dioxinas, pero según las concentraciones actuales de cloro en los incineradores, la entrada de cloro residual no parece estar significativamente relacionada con la entrada y la importancia de la producción de dioxinas. Por otro lado, es evidente que las variables de funcionamiento (temperatura, concentración de oxígeno, refrigeración de gases, presencia de hollín, entre otros) juegan un papel significativo en la formación de los compuestos mencionados (William David Jordan Morales, 2018).

## 8. CONCLUSIONES

A través de la revisión bibliográfica citada en esta monografía, se estableció que la temperatura ideal para el posible desarrollo del pirólisis de desechos plásticos es de 400 °C. Esto se debe a que el pirólisis del proceso no se desarrolla completamente a temperaturas inferiores a 300 °C. El pirólisis de desechos plásticos produce 3 fracciones que se utilizarían en procesos secundarios. La fracción líquida y gaseosa tiene una buena utilidad para generar energía y la fracción sólida genera coque que puede ser utilizado como carbón activo.

Los autores recomiendan manejar tiempos de reacción en el reactor de pirolisis entre 60 minutos y 120 minutos, debido a que en este rango de tiempo se logra producir la fracción líquida necesaria para utilizar como combustible y esto permite ahorrar tiempo y energía durante todo el proceso.

En el análisis de proyectos realizados por (Elizabeth & Marisol, 2014), (Ilbay, 2018) y (Caleño, 2020) se logró evidenciar que las tecnologías realizadas por estos autores en el proceso de pirólisis obtuvieron rendimientos de fracciones líquidas alrededor del 72% para el polietileno de baja densidad (PEBD), el 68% para el poliestireno (PS) y el polietileno de alta densidad (PEAD) y 47% para polipropileno (PP) con una eficiencia óptima de rangos de temperaturas que van desde los 400°C a los 900° C.

Cabe destacar que el plástico que no debería utilizarse en ningún proceso de pirolisis y que sería necesario eliminarlo de la categoría de combustibles es el policloruro de vinilo (PVC) porque su combustión produce compuestos altamente tóxicos (organoclorados). El el polietileno de baja densidad (PEBD), por otro lado, tiene un alto contenido de hidrocarburos aromáticos, lo que lo vuelve en un gran potencial energético e ideal para su uso en pirólisis.

### Trabajos citados

- Andrady, A. L. (2011). *Microplastics in the marine environment*. Obtenido de Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11003055?via%3Dihub>
- Arael Alfonso Cardero, E. A. (2020). *Recuperación energética de los residuos sólidos urbanos de La Habana: Tratamientos biológicos, termoquímicos, y reciclaje*. Obtenido de Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría: [https://www.researchgate.net/profile/Jhosane-Pages-Diaz/publication/346326219\\_Recuperacion\\_energetica\\_de\\_los\\_residuos\\_solidos\\_urbanos\\_de\\_La\\_Habana\\_mediante\\_tratamientos\\_termoquimicos\\_biologicos\\_y\\_reciclaje/links/5f6e68cb458515b7976baed1/Recuperacion-energ](https://www.researchgate.net/profile/Jhosane-Pages-Diaz/publication/346326219_Recuperacion_energetica_de_los_residuos_solidos_urbanos_de_La_Habana_mediante_tratamientos_termoquimicos_biologicos_y_reciclaje/links/5f6e68cb458515b7976baed1/Recuperacion-energ)
- Azubuiké Francis Anene, S. B.-A. (2018). *Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/3979>
- Caleño, F. D. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente*. Obtenido de Universidad Autónoma de Occidente: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Cantor, J. A., & Cuta, M. A. (2021). *Revisión de los procesos para la producción de combustibles provenientes de residuos plásticos*. Obtenido de Universidad Antonio Nariño: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5005>
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Díaz de Santos.
- Cindy Bohorquez Escorcía, J. L. (10 de 09 de 2019). *Principios de Economía Circular*. Obtenido de ODEB (Observatorio de Desarrollo Económico): <https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/dinamica-economica-industria/principios-de-economia-circular>
- Daniel, V. C., & Manuel, R. A. (2016). *Proceso de conversión de residuos plásticos en combustibles*. Obtenido de Universidad de Guanajuato: <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/3048/1/Proceso%20de%20Conversi%C3%B3n%20de%20Residuos%20Pl%C3%A1sticos%20en%20Combustible.pdf>
- Daniilo, L. Q. (2020). *Obtención de combustibles a partir de Tereftalato de Polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación*. Obtenido de

- Universidad Politecnica Salesiana Ecuador:  
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18901>
- Diana, O. (2022). *UAESP realizó la V Mesa Industrial de Plástico en Bogotá*. Obtenido de UAESP: <https://www.uaesp.gov.co/noticias/uaesp-realiza-la-v-mesa-industrial-plastico-bogota>
- Diaz, O. L., & Zagarra, A. C. (2019). *Diseño de un sistema de control de temperatura, haciendo uso de técnicas de control para optimizar un proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirólisis*. Obtenido de Universidad Santo Tomás: <https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/16851/6/2019GuioOscar.pdf>
- Elizabeth, E. M., & Marisol, N. C. (2014). *Estudio de viabilidad tecnica preliminar para la obtencion de combustibles mediante la pirolisis de residuos plasticos generados en la Universidad Politecnica Salesiana*. Obtenido de Univerisdad Politecnica Salesiana : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680.pdf>
- Elizabeth, E. M., & Marisol, N. C. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirolisis de residuos plasticos generados en la universidad politécnica salesiana* . Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680.pdf>
- Férez, M. d. (2007). *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados*. . Obtenido de Universidad de Alicante: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis\\_doctoral\\_hernandez\\_ferez.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis_doctoral_hernandez_ferez.pdf)
- Figueroa, M. F. (2021). Economía sostenible en Colombia, ¿cuáles son las 9R? *El Universal*.
- Foundation, E. M. (2017). *Economia Circular*. Obtenido de <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>
- Franco, E. S. (04 de 2021). *Carton como alternativa al caseton de poliestireno en lasas nervadas*. Obtenido de Universidad Autonoma de Aguascalientes: <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/2298/457272.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Greenpeace. (2021). *Di basta a los plásticos*. Obtenido de <https://www.greenpeace.org/colombia/tag/plasticos/>
- Herrera, H. R. (2018). *Gestion integral de residuos solidos*. Obtenido de Fundacion Universitaria del Area Andina:

<https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/518/Gesti%20Integral%20de%20Residuos%20S%20lidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ilbay, O. G. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10427/1/96T00480.PDF>
- JingxuanYangabJenny, R. B. (2016). *Fast co-pyrolysis of low density polyethylene and biomass residue for oil production*. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416303740?via%3Dihub>
- José M Arandes, J. B. (2004). Reciclado de residuos plasticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 30-37.
- Katheribe, M. T., & Cristina, S. C. (2018). *Evaluación de la obtención de diésel a nivel laboratorio mediante pirólisis a partir de residuos plásticos provenientes del proceso de empaclado en la empresa Atlantic FS S.A.S*. Obtenido de FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA:  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6951/1/6131986-2018-2-IQ.pdf>
- Loaiza, H. A. (2012). *Diagnostico del manejo de los residuos solidos plasticos y de las actividades de reciclaje que se promueven en la ciudad de Puerto Montt y el analisis de una propuesta de segregacion de residuos solidos plasticos aplicables a una poblacion de la ciudad*. Obtenido de Universidad Austral de Chile:  
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bpmfcih632d/doc/bpmfcih632d.pdf>
- López, E. N. (4 de 05 de 2020). *Estudio de la pirólisis rápida de plástico PEBD*. Obtenido de UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ:  
<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/9240/1/131974.pdf>
- Maria Paula Mesa Upegui, C. i. (2016). *Evaluacion del proceso de pirolisis para la produccion de Diesel a nivel laboratorio a partir de residuos plasticos de industrias de alimento*. Obtenido de Fundacion Universidad de America:  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/477/1/6111667-2016-2-IQ.pdf>
- Mehrdad SeifaliAbbas-Abad, M. N. (07 de 2014). *Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products*. Obtenido de sciencedirect:  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0165237014001296?token=075E11F306C66A851A623D58C9E894BFA8D7D2E02CC01F912261D713F7EBB52B2590C699C5D38AB453794C6EC626D7E2&originRegion=us-east-1&originCreation=20221104193739>

- Myriam Mancheno, S. A. (2016). Aprovechamiento energetico de residuos plasticos obteniendo combustibles liquidos por medio de pirólisis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol 23(1): 53-59. Obtenido de LA GRANJA: Revista de ciencias de la vida: <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/23.2016.06>
- Paul T Williams, E. A. (1999). *Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016523709900011X?via%3Dihub>
- Paz, M. (11 de 2016). *Reciclado de PET a partir de botellas post consumo*. Obtenido de Universidad Nacional de Córdoba: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5567/PAZ%2C%20MARIA%20-%20PI%20Reciclado%20de%20PET%20a%20partir%20de%20botellas%20post%20consumo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- PlasticsEurope. (2019). *Plastics – the Facts 2019*. Obtenido de <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2019/>
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 137-144. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5522/1/Oswaldo-Proa%c3%b1o.pdf>
- Quiroga, F. D. (2020). *Obtención de combustibles a partir de tereftalato de polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación*. Obtenido de Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18901/1/UPS-CT008803.pdf>
- Rojas, A. E. (18 de 10 de 2016). *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO: <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/116/1/387385.pdf>
- Sáez, I. A. (Julio de 2008). *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*. Obtenido de Universidad de Alicante: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis\\_doctoral\\_ignacio\\_aracil.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf)
- Sáez, I. A. (07 de 2008). *Universidad de Alicante*. Obtenido de Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP): [file:///C:/Users/User/Downloads/tesis\\_doctoral\\_ignacio\\_aracil.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf)
- Sebastian Amar Gil, A. N. (2019). *Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos*. Obtenido de Universidad del Norte:

<https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/11759/214421444622>

Suárez, D. L. (08 de 2019). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de fuel oil a partir de residuos plásticos mediante un proceso pirolítico en Arequipa.*

Obtenido de Universidad Católica San Pablo:

[http://54.213.100.250/bitstream/UCSP/16097/1/POLANCO\\_SUAREZ\\_DIA\\_RES.pdf](http://54.213.100.250/bitstream/UCSP/16097/1/POLANCO_SUAREZ_DIA_RES.pdf)

Torres, C. A. (2019). *Producción de hidrocarburos a partir de la pirolisis de Nuez de mango con catalizadores y mezcla con plástico.* Obtenido de Universidad de los Andes:

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/44339/u827185.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

William David Jordan Morales, P. O. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la epoch.* Obtenido de Escuela superior politecnica de chimborazo:

<http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/8661/1/96T00463.pdf>

Wong SyieLuing, S. A. (2021). *Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review.* Obtenido de ScienceDirect: <file:///C:/Users/User/Downloads/1-s2.0-S0165237021002515-main.pdf>

Xavier Elías Castells, E. V. (2012). *La pirolisis.* Madrid: Ediciones Diaz de Santos. Obtenido de 2012:

[https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=29Vl\\_0IqlnC&oi=fnd&pg=PA513&dq=Pirolisis+de+plastico+del+PVC&ots=-1ZaqDkbVR&sig=q83mBQmshHS9lqDHyiJRmCLCtHg#v=onepage&q=PVC&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=29Vl_0IqlnC&oi=fnd&pg=PA513&dq=Pirolisis+de+plastico+del+PVC&ots=-1ZaqDkbVR&sig=q83mBQmshHS9lqDHyiJRmCLCtHg#v=onepage&q=PVC&f=false)

Y.-H. Lin, M.-H. Y. (2007). Chemical catalysed recycling of waste polymers: Catalytic conversion of polypropylene into fuels and chemicals over spent FCC catalyst in a fluidised-bed reactor. *ScienceDirect*, 272-277.