

# PROCESO DE CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN COMBUSTIBLE

Caro-Rodríguez, Juan Felipe (1), Riesco-Ávila, José Manuel (2), Barrón-Hernández, Cecilia Isabel (2), Vásquez-Hernández, Julieth Berenice (2)

1 [Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomas de Aquino, Sede Bogotá] | [juancaro@usantotomas.edu.com]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [riesco@ugto.mx]

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la pirólisis de residuos de polietileno de alta densidad, provenientes de la agricultura. El equipo utilizado fue un reactor cerrado tipo *“batch reactor”* y los hidrocarburos líquidos obtenidos fueron caracterizados para obtener sus propiedades físico-químicas. Se probaron dos rampas de calentamiento para incrementar el tiempo de residencia del plástico en el reactor y se logró convertir el 87% del residuo procesado en combustible líquido. Las propiedades de este combustible son muy similares a las del diesel ligero, lo cual lo hace adecuado para ser usado en motores de combustión interna de encendido por compresión.

## Abstract

In this work the results obtained from the pyrolysis of high density polyethylene wastes from agriculture are presented. The equipment used was a batch reactor, and the liquid hydrocarbons obtained were characterized to obtain their physic-chemical properties. Two heating ramps were tested to increase the residence time of the plastic in the reactor, and it was possible to convert 87% of the processed waste into liquid fuel. The properties of this fuel are very like those of light diesel, which makes it suitable for use in compression ignition internal combustion engines.

### Palabras Clave

Reciclaje; Residuos Plásticos; Pirólisis.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo muestra el desarrollo experimental del proceso de pirólisis, llevado a cabo en un equipo para laboratorio, donde se analiza la producción de hidrocarburos líquidos a partir de residuos plásticos procesados en forma de pellets de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), los cuales se obtiene a partir de cintilla de riego.

Los plásticos son sustancias químicas sintéticas las cuales se denominan polímeros, son cadenas formadas a partir de monómeros unidos por fuerzas moleculares [1]. En función de su estructura y su comportamiento cuando son expuestos a la temperatura pueden clasificarse en termoplásticos, termofijos y elastómeros.

Los termoplásticos, al estar compuestos por cadenas lineales y ramificadas, se funden al ser sometidos al calor, esta propiedad es fundamental para el reciclaje, pues permite recuperar los materiales y volver a utilizarlos mediante procesos físicos simples, como el calentamiento [2]. Adicionalmente, se puede decir que en general todos los plásticos son reciclables debido a que aproximadamente el 80% de los plásticos que se producen son termoplásticos [3].

### Reciclaje

La clasificación más aceptada para los procesos de reciclaje de plásticos los divide en cuatro categorías.

#### *Reciclaje primario o re-extrusión*

Consiste en la separación, limpieza, peletizado, moldeado, moldeado por inyección, moldeado por compresión y termo formación [4].

#### *Reciclaje secundario o mecánico*

Se convierte al plástico en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. Este método elimina la necesidad de separar y limpiar, y de esta forma se mezclan los plásticos, se muelen y funden juntas

dentro de un extrusor, generalmente para obtener pellets [2].

#### *Reciclaje terciario o químico*

Se degrada el polímero a compuestos químicos básicos y combustibles [4]. Este tipo de reciclaje es diferente de los dos primeros mencionados anteriormente fundamentalmente porque involucra un cambio químico, no sólo un cambio físico [4]. En el reciclaje terciario las largas cadenas del polímero se rompen en pequeños hidrocarburos (monómeros) o monóxido de carbono e hidrógeno. El reciclaje terciario cuenta con cuatro métodos principales: pirólisis, gasificación, metanólisis y glicólisis [4].

#### *Reciclaje cuaternario o valorización energética*

Consiste en el calentamiento del plástico con el objeto de usar la energía térmica liberada de este proceso para llevar a cabo otros procedimientos, es decir, el plástico es utilizado como un combustible con el objetivo de reciclar energía [4].

### Pirólisis

También conocida como craqueo térmico, Arthur Warner define pirólisis como “un proceso de reforma en el cual la gasificación de los compuestos fácilmente degradables se hace por un calentamiento”, adicionalmente las ventajas de la pirólisis son: **a)** No involucra un paso de separación, **b)** Recupera los plásticos en sus materias primas, **c)** La obtención carbón residual para otros procesos petroquímicos [3], [4].

## MATERIALES Y MÉTODOS

### HDPE- Polietileno de alta densidad

Se caracteriza por ser una larga cadena de polímeros lineales con grado de cristalinidad y baja ramificación lo cual conduce a alta resistencia, por lo cual es ampliamente utilizado en la fabricación de botellas de leche, botellas de detergente, y más. Contribuye alrededor del 20% de los residuos

plásticos [5]. En la literatura registra eficiencias en la recuperación de masa superiores al 80% cuando es sometido al proceso de Pirólisis en un rango de temperaturas de 300°C – 500°C [5].



**Figura 1.** Pellets de HDPE, obtenidos en RECICLA.LO a partir de la cintilla de riego.

Otro producto hecho a partir de HDPE es la Cintilla de Riego utilizada en el sector agrícola para distribuir el agua en los cultivos; sin embargo, requiere un tratamiento particular ya que esta debe pasar por un estricto lavado antes de su reciclaje, posteriormente esta Cintilla es peletizada.

### Equipo para pirólisis en el laboratorio

Para realizar la pirólisis se utiliza un equipo Be-h de origen japonés de la compañía Blest Co Ltd., este equipo de laboratorio tiene una capacidad de 1 Kg, cuenta con dos resistencias eléctricas, funciona a presión atmosférica y puede alcanzar una temperatura máxima de 500 °C [6].

En base a la literatura y experimentaciones previas se tenían las siguientes hipótesis: **1)** El tiempo de residencia del material en el calentador favorece la separación de las cadenas poliméricas; **2)** La temperatura debe ser escalonada con el fin de ir rompiendo las cadenas moleculares gradualmente; **3)** Si la temperatura del vaso donde se deposita el aceite se incrementa mucho se obtendrán ceras, lo cual no se desea. Entonces, a partir de las hipótesis se realizaron dos experimentos:

- *Primer experimento*

El parámetro de cambio de temperatura es cuando hay un burbujeo muy lento (inferior a una burbuja por minuto) o ausencia de burbujas.

- *Segundo Experimento*

El parámetro de cambio de temperatura es una rampa de calentamiento que se diseñó en base al experimento # 1 la cual se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1 - Rampa de calentamiento controlada para el experimento 2.**

No. Ajuste	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
0	350	30
1	375	35

2	400	60
3	425	257
4	450	214

### Metodología de filtrado

Una vez obtenidos los dos productos de HDPE se filtraron estos aceites hasta obtener un líquido cristalino ya que se tenían sólidos en suspensión, se utilizó un montaje conformado por filtros (grado 1 y grado 4) de diámetro 15 cm y se usó una bomba de vacío para crear una contrapresión que ayudara al aceite a fluir hacia el vaso.

### Mediciones de densidad y viscosidad

Para medir la densidad se utilizó un picnómetro de 50 m L, este provee una medición indirecta de densidad al utilizar la **ecuación 1**.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Para obtener la viscosidad se utilizó el procedimiento Cannon-Fenske con un viscosímetro cinemático ASTM, bajo condiciones de temperatura de 40°C. Según la norma ASTM D445 se debe aplicar la **ecuación 2** para obtener la viscosidad cinemática, en la cual se requiere un constante del viscosímetro la cual se registra en el certificado de calibración del instrumento la cual es **C=0,5245 cSt/s** [7], [8].

$$\nu = C * t \quad (2)$$

Esta norma también permite hallar el valor de la viscosidad dinámica una vez se conoce el valor el de la viscosidad cinemática y sabiendo también la densidad del líquido mediante la **ecuación 3** [8].

$$\mu = \rho * \nu \quad (3)$$

### Equipo para medir poder calorífico

Para medir el poder calorífico se utiliza un calorímetro IKA C 2000 junto con un mini Chiller KV 600. En esta prueba se mide el Poder Calorífico Superior de combustible (PCS) que se define como la cantidad de calor liberado cuando un combustible se quema por completo en un

proceso de flujo estacionario, los productos vuelven al estado de reactivos y el H<sub>2</sub>O en los productos esta en forma líquida [9].

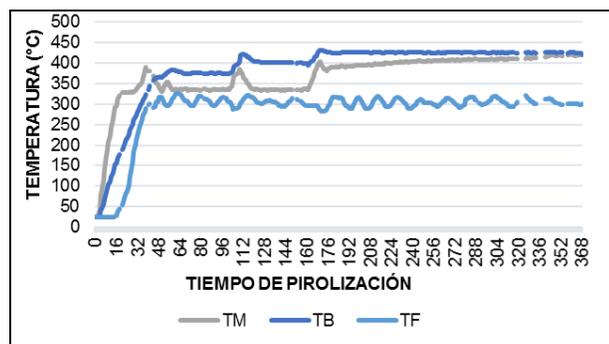
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Pirólisis de HDPE

En este proceso interesa conocer cuanta cantidad de combustible se obtuvo a partir de 1 Kg de HDPE.

- *Primer experimento*

**(1) Rango de temperaturas:** 350°C-425°C con un incremento de 25°C, manteniendo una diferencia de temperatura con la resistencia media de 40°C por debajo, y la temperatura de la resistencia del filtro se mantuvo constante en 300°C. En la **figura 2** muestra la rampa de temperaturas de las tres resistencias en función del tiempo. **(2) Tiempo de residencia:** 9 horas aproximadamente. **(3) Masa recuperada:** 850 g. equivalente al 85% de la materia prima. **(4) Volumen:** 992 mL. **(5) Agua utilizada:** 2056,6 mL de los cuales se recuperó el 99,35%.



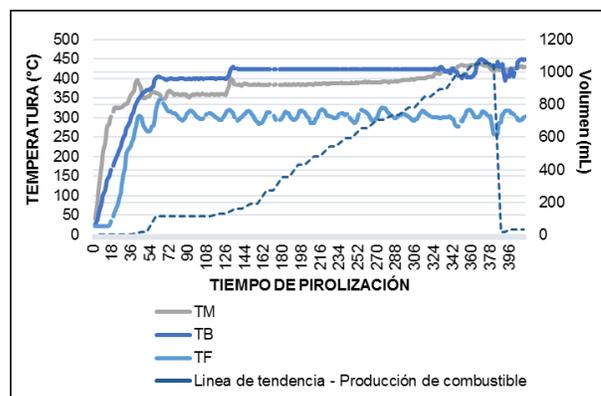
**Figura 2.** Rampa de calentamiento del experimento # 1, donde: (TM) es la temperatura de la resistencia de la mitad del calentador, (TB) es la temperatura de la resistencia de la parte baja de calentador, (TF) es la temperatura de la resistencia del filtro.

- *Segundo Experimento*

En este experimento se diseñó una rampa de calentamiento a partir del análisis del experimento # 1, la cual se muestra en la **Tabla 1** la cual se llevó a una temperatura superior con el fin de obtener más producto y obtener menos ceniza ya que al incrementar la temperatura se rompen más cadenas moleculares. Adicionalmente, se llevó un

registro de como incrementaba el volumen (**figura 3**), se observa una caída en la producción de combustible aproximadamente en el minuto 378 debido a que se realizó un drenado del producto.

**(1) Rango de temperaturas:** 350°C-450°C con un incremento de 25°C, manteniendo una diferencia de temperatura con la resistencia media de 40°C por debajo, la resistencia del filtro se mantuvo constante en 300°C. En la **figura 3** muestra la rampa de temperaturas de las tres resistencias en función del tiempo. **(2) Tiempo de residencia:** 10 horas aproximadamente. **(3) Masa recuperada:** 874 g. equivalente al 87,4% de la materia prima. **(4) Volumen:** 1020 mL. **(5) Agua utilizada:** 2081,6 mL de los cuales se recuperó el 99,01%.



**Figura 3.** Rampa de calentamiento del experimento # 2, donde: (TM) es la temperatura de la resistencia de la mitad del calentador, (TB) es la temperatura de la resistencia de la parte baja de calentador, (TF) es la temperatura de la resistencia del filtro.

### Producto de la filtración

Recapitulando, cada combustible se filtró 1 vez con el filtro grueso y 3 veces con filtros delgados diferentes, en la **figura 4**. Se puede ver el aceite antes de ser filtrado con una apariencia opaca y de color amarillo; también se puede apreciar el aceite filtrado con una apariencia cristalina y de color ocre.



**Figura 4.** Producto obtenido en los dos experimentos antes y después de filtrado.

## Propiedades combustibles

- *Densidad*

Para las mediciones indirectas de densidad se programó en Excel la ecuación 1 y se sacaron los promedios de los datos obtenidos, con el fin de sacar una densidad promedio. En la **Tabla 3** se puede observar los datos tomados en las tres mediciones realizadas y el valor de Densidad promedio para ambos experimentos.

- *Viscosidad*

Para las mediciones indirectas de viscosidad se programó en Excel la **ecuación 2** y la **ecuación 3**, con el fin de hallar la viscosidad cinemática promedio ( $\bar{\nu}$ ) y viscosidad dinámica promedio ( $\bar{\mu}$ ),

- *Poder calorífico*

Para cada experimento se realizaron 3 mediciones de PCS y estos se promediaron para obtener un promedio de cada muestra, al comparar este valor con la literatura este valor se asemeja a el Diésel Ligero que registra el libro de Termodinámica Cengel en su Tabla A-27 [9]. Los valores obtenidos se registran en la **tabla 3**.

**Tabla 3-**Comparación de propiedades entre combustibles.

	$\bar{\nu}$ (cSt)	$\bar{\mu}$ (cP)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (J/g)
Experimento # 1	2,49	1,93	0,7747	46625
Experimento # 2	2,54	1,96	0,7737	46770
Diésel Ligero [9]	2,5	2,05	0,78 - 0,84	46100

## CONCLUSIONES

**(1)** El reciclaje terciario representa una alternativa de recuperación para el HDPE ya que se obtiene un combustible muy similar al Diésel el cual se puede utilizar en la aplicación que lo requiera y se reduce el volumen de los desechos. La masa del agua que queda dentro del vaso se contamina ya que estos combustibles son higroscópicos.

**(2)** Hacer una rampa de calentamiento en el Piroizador es efectivo ya que se logra que toda la

masa vaya alcanzando una temperatura uniforme y se van rompiendo las diferentes cadenas en orden, estas rampas se pueden llegar a optimizar en función de la producción de Volumen junto con un análisis de consumo energético y económico.

**(3)** Se debe hallar la temperatura máxima para la pirólisis en la cual se convierta la mayor cantidad de producto en aceite y no se generen ceras, esto se evidencia en la apariencia de las cenizas en el Piroizador, estas deben asemejar lo más posible a un polvo; esto también ayuda a la limpieza posterior del calentador.

## REFERENCIAS

- [1] J. Smith, William & Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 2006.
- [2] A. Vázquez Morillas, R. M. Espinosa Valdemar, M. Beltrán Villavicencio, and M. Velasco Pérez, "El reciclaje de los plásticos," *Anipac*, p. 14, 2014.
- [3] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2625–2643, 2009.
- [4] Rezagos, "Reciclado de plástico," 2015. [Online]. Available: <http://www.rezagos.com/pages/reciclado-de-plastico.html>.
- [5] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, 2016.
- [6] L. Blest Co., "Be-h - Blest Co.,LTD." [Online]. Available: <http://www.blest.co.jp/eng/service/be-h/>. [Accessed: 20-Jul-2017].
- [7] I. Technical Glass Products, "CERTIFICATE OF CALIBRATION (For ASTM Kinematic Viscometer)." p. 1, 1991.
- [8] A. S. for T. and M. ASTM, "Viscosity of transparent and opaque liquids (kinematic and dynamic viscosities)," vol. 552, no. 37, 2004.
- [9] Y. a. Cengel and M. E. Boles, "Termodinámica - Cengel 7th," *Termodinámica*, p. 1456, 2011.