

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS PLÁSTICOS OBTENIENDO COMBUSTIBLES LÍQUIDOS, POR MEDIO DE PIRÓLISIS

ENERGY USE GETTING PLASTIC WASTE LIQUID FUELS BY PYROLYSIS

Myriam Mancheno*, Servio Astudillo, Pablo Arévalo, Inés Malo, Tania Naranjo, Johana Espinoza

Universidad Politécnica Salesiana, Campus El Vecino, Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Ecuador

*Autor para correspondencia: mmancheno@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 21 de enero de 2015. Aceptado, tras revisión, el 24 de junio de 2015

Resumen

Este estudio da a conocer una forma eficiente de gestionar los residuos plásticos obteniendo combustibles a través del proceso de pirólisis de poentilentereftalato, polietileno de alta densidad y poliestireno, residuos plásticos de mayor generación dentro de la Universidad Politécnica Salesiana; en la investigación se determinó que el residuo que mayor porcentaje de fracción líquida produce es el poliestireno. sin embargo, de acuerdo a los análisis el de mejor calidad es el polietileno de alta densidad considerado como crudo mediano. De acuerdo a los análisis de cromatografía, se muestra que las fracciones líquidas del proceso de pirólisis de residuos plásticos contienen sustancias que forman parte de los combustibles y petróleos, lo que confirma la obtención de combustibles líquidos de características semejantes a los tradicionales y que se pueden usar para generar energía en motores de combustión.

Palabras claves: pirólisis, residuos plásticos, combustibles líquidos, poliestireno, polietileno.

Abstract

This study, found an efficient way to manage plastic wastes obtaining fuels; by pyrolysis process at poentilentereftalato, high density polyethylene, polystyrene and high generation plastic wastes at the Universidad Politécnica Salesiana; in the investigation was determined that the highest percentage of liquid fraction residue was achieved by polystyrene. however, according to analyzes the best quality was the high density polyethylene considered medium crude. According to chromatographic analysis, this research demonstrates that the liquid fractions of pyrolysis of plastic wastes contain substances that are part of fuels and oils, which confirms the existence of liquid fuels with similar characteristics to traditional ones and can be used in combustion engines.

Keywords: pyrolysis, plastic waste, liquid fuels, polystyrene, polyethylene.

Forma sugerida de citar: Mancheno, M., *et. al.* 2016. **Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis.** La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 23(1): 53–59. ISSN impreso: 1390-3799. ISSN electrónico: 1390-8596.

1 Introducción

Los plásticos han reemplazado a otros materiales tradicionales como los metales, cerámicas y maderas, en muchas de sus aplicaciones (Salinas y Vasquez, 2010) es por ello que la producción de plásticos a nivel mundial ha aumentado una media de un 10 % anual (Almeida, 2006). En Ecuador en el año 2002 se producían 336 ton/día de residuos plásticos de origen doméstico, industrial y agroindustrial, mientras que en Cuenca se genera alrededor del 22 % por año de plásticos, del total de materiales reciclables. Dando lugar a una problemática ambiental que tiene dos variantes: La explotación de un recurso natural no renovable y problemas de disposición y tratamiento de residuos (MAVDT2, 2008).

En busca de una solución a este problema medio ambiental se han planteado varias técnicas para el tratamiento de residuos plásticos, entre ellas, reciclado mecánico del cual se obtienen materias primas secundarias con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original (Aracil, julio de 2008; Espinoza, 2009), aprovechamiento energético en donde el plástico es usado como combustible debido a su elevado poder calorífico, aquí se pueden aprovechar todo tipo de plásticos incluso aquellos que presentan deterioro o suciedad (Aracil, julio de 2008), y reciclado químico que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis, en donde se descomponen los plásticos usados en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos (Espinoza, 2009).

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C, obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables (Aracil, julio de 2008). Este es un proceso se ha utilizado desde hace mucho tiempo atrás, es



Figura 1. Reactor de Pirólisis utilizado en esta investigación

así que en la década de los 80, se desarrolló en Japón, pirólisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad. (Helt y col., 1984 citado por (Conesa, 1996)). En España, mediante este proceso, se comprobó que a mayor temperatura, se da la formación de compuestos más estables térmicamente (Aracil, julio de 2008). De igual manera, en Colombia, al pirolizar los residuos sólidos municipales se obtuvieron productos con alto poder calorífico (Gamarra, 2006). En Ecuador, en los experimentos realizados por (Proaño y Crespo, 2009), usando polietileno de alta densidad, se obtiene diésel, kerosene y gasolina contenida en la fracción líquida.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizó: polietileno de alta densidad, poliestireno y polietilentereftalato provenientes de la Universidad Politécnica Salesiana previamente lavados, secados y triturados. Además se usó un catalizador de zeolita que, previo a su uso, pasó por el analizador de humedad para determinar el porcentaje de la misma y por una mufla para su desecación.

El reactor de pirólisis fue el tipo semi-batch, de 1 litro de capacidad, con calentamiento eléctrico (niquelina), marca UPS, termocupla, sistema de control térmico, manómetro con capacidad de 1 bar, con entradas para gas (N₂) y aire (cámara de enfriamiento), salida de productos, válvula de paso. El sistema se muestra en la Figura 1.

Para los análisis físicos de la fracción líquida obtenida se utilizaron: termómetro, picnómetro de 5ml, viscosímetro de Oswald, balanza analítica, calentador con agitador, congelador, equipo de destilación.

Además, como complemento a los análisis realizados se usa un cromatógrafo, con un estandar que contiene acenafteno, acenaftileno, antraceno, benz (a) antraceno, benz (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno, benzo (g,h,i) perileno, criseno, fluoranteno, fluoreno, naftaleno, indeno (1,2,3-c,d) pireno, fenantreno, pireno que son las sustancias que se analizarán en la muestra, se trabaja con solvente de acetonitrilo (100ml), con un detector tipo GC/ FID, una columna DB-5,30m, un diámetro interior de 0,25mm, un volumen de inyección de 1ul a 320°C y flujo de 1ml/ min. La corrida inicia con una temperatura de 110°C por 5min y finaliza con una temperatura de 320°C por 8 min, teniendo una gradiente de 5°C/ min.

Finalmente, para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el software MINITAB.

2.2 Métodos

2.2.1 Clasificación de residuos plásticos

Para determinar los plásticos producidos en mayor cantidad se procedió a clasificar los residuos plásticos en base a la NTE INEN 2634:2012 “Disposición de desechos plásticos post-consumo, Requisitos” (INEN, NTE INEN 2634:2012 Disposición de desechos plásticos post-consumo, Requisitos., 2012). Para el pre-tratamiento de los residuos plásticos, antes de su ingreso al reactor, se procede a su lavado, secado y triturado.

2.2.2 Ensayos para la determinación de las variables del proceso

Las variables que se manejaron fueron la temperatura, el tiempo de residencia y los tipos de residuos plásticos, las cuales se modifican de acuerdo al ensayo que se realice. La presión que es regulada por la válvula de paso se establece como constante, y se trabaja con empaque de teflón para evitar la fuga de los gases generados durante el proceso, asegurando que permanezcan el tiempo adecuado dentro del reactor.

Al iniciar la evacuación de los gases, estos pasaron por los erlenmeyer refrigerados de 250 ml, convirtiéndose en producto líquido; mientras que los no condensables, fueron enviados al erlenmeyer de 1000 ml para medir su volumen. Al finalizar el proceso, se pesó nuevamente los erlenmeyer de 250ml que contenían el producto líquido para determinar por diferencia de pesos la cantidad de líquido recolectado, y se midió el volumen de agua desalojado que representa la cantidad de gases no condensables producidos.

Para determinar la temperatura de trabajo, se realizaron pruebas a 220 °C de temperatura, con tiempos de residencia de 10, 15, 20 y 30 minutos, a 9 PSI de presión, utilizando 15 g de polietileno de alta densidad. Se realizaron ensayos para determinar las condiciones más óptimas, tomando como variable el tiempo de residencia, estableciéndose valores de: 30, 60 y 120 minutos, a una temperatura de 400°C, con Polietileno de Alta Densidad y Presión constante (9 PSI).

Para la valoración de la pirólisis con diferentes tipos de plásticos, se utilizaron tres tipos de plástico: polietileno de alta densidad, polietileno tereftalato y poliestireno; trabajando a una temperatura de 400°C, tiempo de residencia de 30 minutos definido en la prueba anterior y a presión constante de 9 PSI.

2.2.3 Análisis de la fracción líquida obtenida

De las fracciones líquidas resultantes de la pirólisis de polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS), se pro-

cede a realizar las siguientes pruebas físicas: color y olor en base a la percepción del observador. Densidad basada en la norma venezolana COVENIN 2052-93 “Productos Derivados del Petróleo. Determinación de la Densidad y la Densidad Relativa de Líquidos por Medio del Picnómetro Bingham”. Viscosidad en base a la NTE INEN 810:1986 “Productos de Petróleo. Determinación de la Viscosidad Cinemática y Dinámica en Líquidos Transparentes y Opacos” (INEN, NTE INEN 810:1986). Punto de Inflamación en base a la NTE INEN 808:1986 “Productos de Petróleo”. Determinación de los “Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto Cleveland” (INEN, NTE INEN 808:1986, 1986) y Punto de Congelación basado en las normas internacionales ASTM, D 2386-06 “Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels” (ASTM, 2012). Dichas pruebas no se pueden realizar con Polietileno Tereftalato (PET), debido a la mínima cantidad de fracción líquida generada.

2.2.4 Análisis de la fracción líquida utilizando el cromatógrafo de gases

Previo al análisis en el cromatógrafo de gases, se destiló la fracción líquida, proceso que fue necesario realizar para evitar la contaminación de la columna cromatográfica, tanto del polietileno de alta densidad como del poliestireno para separar las distintas fracciones que serán analizadas rigiéndose en la NTE INEN 926:1982 “Productos de Petróleo. Ensayos de Destilación” (INEN, NTE INEN 926:1982, 1982). El sistema de destilación se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Sistema de destilación utilizado en esta investigación

En el cromatógrafo de gases, se procedió a diluir las muestras con acetonitrilo de las diferentes fracciones destiladas, para disminuir su concentración, se prepararon 5 viales: un vial de acetonitrilo para la limpieza de la columna, y en los 4 respectivos viales las fracciones obtenidas de los líquidos pirolíticos.

3 Resultados y Discusión

3.1 Clasificación de residuos plásticos

La clasificación de los plásticos se la realizó en el repositorio de residuos sólidos de la Universidad Politécnica Salesiana por un tiempo aproximado de tres meses, posteriormente se procede al pesaje y valoración con el fin de establecer que el residuo plástico de mayor generación dentro de la UPS es el polietilentereftalato, seguido del poliestireno y en tercer lugar el polietileno de alta densidad.

3.2 Proceso de pirólisis a temperaturas menores de 300 °C

Coincidiendo con los análisis realizados por Proaño y Crespo (2009), a temperaturas menores a 300°C se obtiene la acumulación de un producto sólido resinoso, que representa la cantidad de residuo plástico que no ha sido pirolizado totalmente, razón por la cual no se trabaja con temperaturas inferiores para evitar los bajos rendimientos de combustible líquido.

3.3 Determinación del tiempo de residencia más óptimo

En el análisis estadístico de la fracción líquida de pirólisis a 30, 60 y 120 minutos de tiempo de residencia, se obtiene un valor de p mayor a 0.05, demostrando que no existe diferencia significativa entre ellos, lo mismo que se evidencia en el traslape de cajas mostrado en la Figura 3, con lo que se confirma que la variable tiempo no produce resultados diferentes.

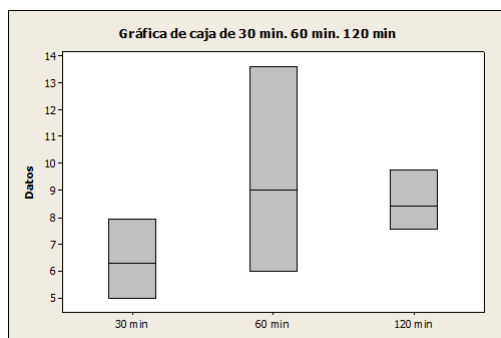


Figura 3. Gráfico de cajas de los tiempos de residencia a 30, 60 y 120 minutos

En los ensayos realizados por Proaño y Crespo (2009) se recomienda tiempos de residencia de 60 y 120 minutos

como los más óptimos, sin embargo, para este estudio se toma un tiempo de residencia de 30 minutos debido a que no existe una diferencia significativa de producción de fracción líquida en los diferentes tiempos planteados. Además considerando que, con ello se disminuye el consumo de energía eléctrica así como el tiempo empleado en el desarrollo de cada prueba.

3.4 Valoración de la pirólisis con diferentes tipos de plásticos

Una vez realizadas las pruebas con las condiciones adecuadas de temperatura, tiempo de residencia y presión, se obtuvo un rendimiento promedio del poliestireno PS de 68.55 % como el de mayor porcentaje; seguido del polietileno de alta densidad PEAD con 47.18 % y por último el PET (Polietileno Tereftalato) con 2.13 %. Como se muestra en la Figura 4.

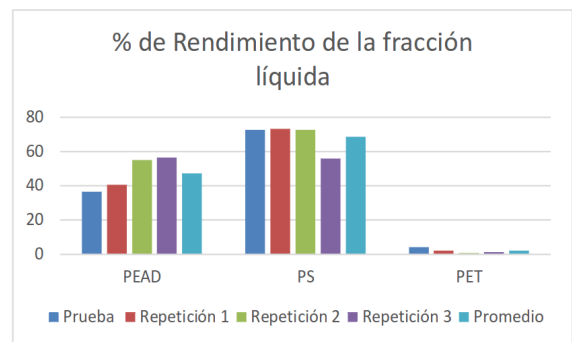


Figura 4. Rendimiento de fracción líquida de los diferentes tipos de plástico. Donde PEAD es polietileno de alta densidad, PS Poliestireno y PET Polietileno Tereftalato

De acuerdo a los análisis ANOVA existe una diferencia significativa en el volumen de fracción líquida obtenido en la pirólisis de PEAD, PS y PET; ratificando con el análisis de Tukey presentado en la ilustración 6, que la cantidad de PS es mayor tanto al PET como al PEAD, siendo el PS el residuo plástico que mayor cantidad de fracción líquida genera.

Por lo tanto, el PS constituye el residuo plástico de mayor generación de fracción líquida y que puede ser usada como combustible o materias primas según (PT. Williams y EA. Williams, 1998) citado por (García, 2005; Chattopadhyay *et. al.*, 2008; Regnier *et. al.*, 1997) citado por (Lee y Cheon, 2009). Sin embargo, del PET se obtiene mayor cantidad de fracción sólida, siendo de importancia para la producción de carbón activado de acuerdo a los estudios realizados por (Almazán, 2006); además, de acuerdo con

lo citado por (Cunliffe *et. al*, 2013) y (Kaminsky, 1993) la fracción gaseosa puede ser utilizada para la generación de energía para el mismo y otros procesos.

3.5 Análisis de la fracción líquida

Para realizar el análisis del olor de la fracción líquida de PEAD y PS se tomó cada fracción y se percibió el desprendimiento de un olor irritante característico de la gasolina, diésel u otros derivados del petróleo. En cuanto al color, el primero es de color amarillo mientras que el segundo presenta un color oscuro tendiente a negro.

La gravedad API es un valor internacional estandarizado por el *American Petroleum Institute*, para determinar la calidad de los hidrocarburos; así como se muestra en la Tabla 1, la fracción líquida de PEAD al tener una gravedad API de 27.435, se ubica dentro de un crudo mediano; y el PS con una gravedad API de 19.160, se considera un crudo pesado.

Hidrocarburos	Gravedad °API
Crudo Liviano	>a 31.1
Crudo Mediano	22.3 - 31.1
Crudo Pesado (P)	10.0 - 22.3
Crudo Extrapesado (XP)	<a 10
Fracción de PEAD	27.435
Fracción de PS	19.160

Tabla 1. Comparación de la gravedad API (Docsetools, 2014)

La viscosidad aumenta cuando disminuye la densidad API, es decir, cuanto más pesado es un crudo mayor viscosidad presentará. Y esto se evidencia claramente en los resultados obtenidos de la viscosidad (Figura 5), así, el crudo resultante de la pirólisis de residuos de polietileno de alta densidad (PEAD) tiene una viscosidad de 0.8418 cSt, con una densidad °API de 27.4352, mientras que el crudo obtenido de la pirólisis de residuos de poliestireno (PS) tiene una viscosidad de 0.9879 y un densidad °API de 19.1601; entonces el poliestireno es más pesado que el polietileno de alta densidad y por tanto más viscoso.

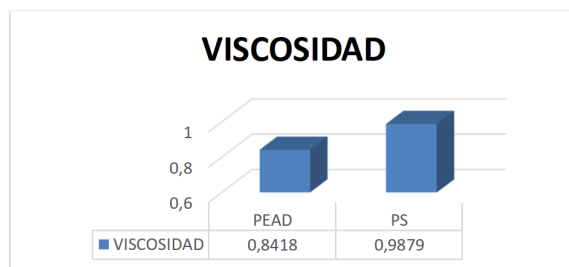


Figura 5. Viscosidad de PEAD y PS

Como se puede observar en la Tabla 2, la fracción líquida de PEAD puede ser almacenada a una temperatura menor a 34.86 °C, para evitar su inflamación, y mayor a -1.41 °C para impedir su congelación; de igual manera el PS debe mantenerse a una temperatura menor a 43.08 °C y mayor a -6.9 °C. Estos resultados están directamente relacionados con los °API, en donde, mientras mayor sea la densidad API de la muestra menor será la temperatura del punto de inflamación y mayor la de congelación, tal como se muestra en la Tabla 2.

Hidrocarburo	Pto. de Inflamación (°C)	Pto. de Congelación (°C)
PEAD	34.86	-1.41
PS	43.08	-6.9

Tabla 2. Punto de inflamación y congelación de PEAD y PS

3.6 Cromatografía de gases

De la destilación de PEAD y PS, se obtuvieron tres fracciones las mismas que están en función del cambio de temperatura, la primera de 0–140 °C, la segunda de 140–170 °C y la tercera corresponde a la fracción no destilada. Esto se evidencia en los resultados presentados en la Tabla 3 en donde, el porcentaje de destilación del PS es mayor al del PEAD, quedando menor cantidad de fracción pesada de PS sin destilar.

	FRACCIÓN 1	FRACCIÓN 2	F1 +F2	% DE DESTILADO	FRACCIÓN 3
PEAD (ml)	3.63.65	7.25	48.33	3.62	
PS (ml)	6.54	3.08	9.62	64.13	1.85

Tabla 3. Fracciones de la destilación de PEAD y PS

Sustancia	Cantidad			
	PS a 140°C	PS a 165°C	PEAD a 140°C	PEAD a 170°C
Fluoranteno	8.374	43.784	0	1.009
Benzo (b) fluoranteno	0.372	0.925	0	6.782
Benzo (k) fluoranteno	2.188	1.717	2.229	1.128
Benzo (a) pireno	0.227	0.208	0	0.992
Indeno (1, 2, 3-c, d) pireno	0.660	1.974	1.448	0.559
Benzo (ghi) perileno	0.816	1.208	1.715	4.531
TOTAL	12.637	49.815	5.392	15.001

Tabla 4. Sustancias contenidas en las fracciones de PS y PEAD

Una vez realizado el análisis en el cromatógrafo de gases se establece que, la muestra que presenta mayor cantidad de compuestos aromáticos es la obtenida por destilación de Poliestireno a 165°C y la de menor cantidad es la muestra de Polietileno de Alta Densidad obtenida a 140°C. Los datos obtenidos se presentan en las tabla 4.

4 Conclusiones

Luego de nuestro estudio se determinó que los residuos plásticos de mayor generación dentro de la Universidad politécnica Salesiana corresponden al Polietileno Tereftalato PET con un 33.72%, seguido por Poliestireno PS con un 19.82% y Polietileno de Alta Densidad PEAD con un 17.62%.

Se determinó que la temperatura óptima para el desarrollo del proceso de pirólisis de residuos plásticos es 400 °C, debido a que a temperaturas menores a 300 °C el proceso de pirólisis no se desarrolla en su totalidad.

Posterior a los ensayos se concluye que los tiempos de residencia no influyen de forma significativa en el rendimiento de fracción líquida.

De acuerdo a los referentes bibliográficos, el proceso de pirólisis de residuos plásticos, genera tres fracciones que pueden ser usados en procesos secundarios; como se demuestra en este estudio la fracción líquida puede emplearse para la producción de energía.

El Poliestireno PS es el residuo plástico que mediante el proceso de pirólisis a 400°C, presión constante y tiempo de residencia de 30 minutos, presenta mayor rendimiento de fracción líquida con el 68.55%.

Según los ensayos realizados se determinó que el Polietilentereftalato PET, no favorece la producción de fracción líquida, generando una mayor cantidad de fracción sólida, que de acuerdo a la información bibliográfica, puede

ser aprovechada como carbón activado.

De los análisis de propiedades físicas se establece, que la fracción líquida obtenida del Polietileno de Alta Densidad PEAD es un crudo mediano, mientras que la del Poliestireno PS se considera un crudo pesado.

Utilizando la técnica de cromatografía de gases se determinó que las fracciones obtenidas de la pirólisis de residuos plásticos de Polietileno de Alta Densidad y Poliestireno contienen Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), que forman parte de los combustibles y petróleos.

Referencias

- Almazán, M.. 2006. Carbones activos a partir de residuos de politereftalato de etileno (PET). **Granada: Editorial de la Universidad de Granada.**
- Almeida, N.. 2006. Ensayos preliminares de pirólisis de residuos sólidos municipales para obtención de biocombustibles. **Bogotá.**
- Aracil, I.. julio de 2008. Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). **Tesis Doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.**
- ASTM. 2012. Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels. **ASTM D 2386-06.**
- Botello, F., F. Avalos y E. Camporredondo. 2010. Pirólisis del polietileno en presencia y ausencia de catalizadores arcillosos. **Prospect.**
- Conesa, J. A.. 1996. Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. **Alicante: Universidad de Alicante.**

- Cunliffe, A., N. Jones y P. T. Williams. 2013. Pyrolysis of composite plastic waste. **Environmental Technology**.
- Docsetools. 2015. http://docsetools.com/articulos-utiles/article_110782.html.
- Espinoza, E.. 2009. Modelo de Gestión de Residuos Plásticos. **Mensoza-Argentina: II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos**.
- INEN. 1982. Ensayos de Destilación. Ecuador. **Productos de Petróleo**. NTE INEN 926:1982.
- INEN. 1986a. Determinación de la Viscosidad Cinemática y Dinámica en Líquidos Transparentes y Opacos. Ecuador. **Productos de Petróleo**. NTE 810:1986.
- INEN. 1986b. Determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto de Cleveland. Ecuador. **Productos de Petróleo**. NTE INEN 808:1986.
- INEN. 2012. Disposición de desechos plásticos post-consumo, requisitos. Ecuador. NTE INEN 2634:2012.
- Kaminsky, W.. 1993. Recycling of polymers by pyrolysis. **Journal de Physique IV**.
- Lee, K. y O. S. Cheon. 2009. Kinetics of the thermal degradation of wax materials obtained from pyrolysis of mixed waste plastics. **Cheonan**.
- MAVDT2. 2008. Construcción de Criterios Técnicos para el Aprovechamiento y Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos don Alta Tasa de Biodegradación, Plásticos, Vidrio, Papel y Cartón. Bogotá.
- Parres, F.. 2005. Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase. Valencia.
- Proaño, O. y S. Crespo. 2009. Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. **Revista Politécnica**. 1: 137–144.
- Salinas, J. y R. Vasquez. 2010. Diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo. **Sangolquí–Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército**.