

Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos

Oswaldo Proaño y Sara Crespo
Departamento de Ingeniería Química
oeborja@yahoo.es

Resumen

Para la obtención de hidrocarburos que puedan utilizarse como combustibles, se realizó la pirolisis del polietileno de alta densidad, empleado en el cultivo de banano, para cubrir el racimo de los frutos. Empleando un reactor de laboratorio de 1 dm³ de capacidad, se experimentó a temperaturas de 300, 350 y 400 °C y tiempos de 0,5, 1 y 2 horas. A temperaturas menores a 300 °C solamente se obtiene un producto sólido resinoso. La mayor cantidad de productos líquidos se obtiene a 400 °C y 2 horas con una composición de 4,3 % de gases, 76,19 % de líquidos y 19,512 % de sólidos. Los gases contienen hidrocarburos: C₁ – C₅. Los líquidos están compuestos de 2 fracciones. La primera fracción contiene hidrocarburos C₁₀ – C₂₆. Que se obtiene destilando la fracción líquida hasta 200 °C. La segunda fracción contiene hidrocarburos mayores a C₂₇. El combustible líquido de la primera fracción contiene un corte amplio de gasolina (C₅ – C₁₀), Kerosene (C₁₀ – C₁₆), y diesel (C₁₄ – C₂₀). Los sólidos contienen: 4,6 % de carbono y 9,4 % de cenizas.

Palabras claves: Biocombustibles, pirolisis, hidrocarburos, análisis combustibles.

Abstract

To obtain hydrocarbons that can be used as fuel is realized the pyrolysis of high density polyethylene used in banana cultivation to cover the cluster of fruit. Using a laboratory reactor capacity of 1 dm³, was experienced at temperatures of 300, 350 and 400 °C and times of 0.5, 1 and 2 hours. At temperatures below 300 °C only gets a solid resinous. Most liquid products obtained at 400 °C and 2 hours with a composition of 4.3 % of gases, 76.19 % of liquids and 19.512 % of solids. The gases containing hydrocarbons: C₁ – C₅. Liquids are composed of 2 fractions. The first fraction contains hydrocarbons: C₁₀ – C₂₆, obtained by distilling the liquid fraction up to 200 °C. The second fraction contains hydrocarbons greater than C₂₇. Liquid fuel from the first fraction contains a wide cut gasoline (C₅ – C₁₀), Kerosene (C₁₀ – C₁₆) and diesel (C₁₄ – C₂₀). The solids contain: 4.6 % carbon and 9.4 % ash.

1 Introducción

Los desechos plásticos representan un problema ambiental muy grave debido a su enorme cantidad y el problema de su disposición alrededor del mundo. Los plásticos se han vuelto materiales indispensables en el mundo moderno y sus aplicaciones en la industria continuamente se incrementan.

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en el año 2002, en Ecuador, se produjeron aproximadamente 336 toneladas diarias de plástico de origen doméstico, industrial y agroindustrial [1].

En los cultivos agrícolas de producción de banano, se utilizan fundas de polietileno de alta densidad, para cubrir y proteger los racimos de la fruta.

En el sector bananero del Ecuador, ubicado en las poblaciones cercanas a la ciudad de Guayaquil en el 2009 se produjeron aproximadamente 941.760 kilogramos [2] de desechos plásticos, ya que después de utilizar las fundas de polietileno, estas son desechadas, enterradas y parcialmente reutilizadas en las factorías que producen artículos de plástico.

Debido a la gran cantidad de desechos plásticos que se generan y la necesidad de soluciones alternativas a la disposición en rellenos sanitarios y combustión de este tipo de material, los métodos de reciclaje terciario o reciclaje térmico como la pirolisis, son objeto de investigación por varios autores alrededor del mundo.

Los plásticos como el polietileno y polipropileno, debido a su naturaleza, que al ser pirolizados a bajas temperaturas producen materiales de composición C₃ hasta C₃₈.

Es necesario añadir que los productos derivados de los desechos plásticos están libres de azufre, compuestos mayormente por gasolina y fracciones ligeras de diesel, recomendados para producción de combustibles [4].

En el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Politécnica Nacional, existe un reactor de capacidad de 1 dm³, de acero inoxidable, que puede reunir las condiciones requeridas de: alimentación, evacuación, calentamiento, agitación y sellado, requeridas, para la realización de la pirolisis de plásticos. Por otra parte, la in-

dustria Plastipoli de la ciudad de Guayaquil, se compromete a proveer las muestras de polietileno empleado en los cultivos de banano, debidamente lavadas, molidas y secadas.

Por los motivos señalados anteriormente, y contando con una amplia información bibliográfica, se puede realizar las pruebas de pirolisis, con el polietileno, utilizado en las bananeras, complementando con equipos auxiliares, para la recolección de los productos obtenidos y la realización de sus respectivos análisis contando con la colaboración de otros laboratorios.

2 Material y Métodos

2.1 Materiales

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizó:

- Polietileno proveniente de la industria bananera, que fue lavado, triturado y secado.
- Para el análisis del tipo de polietileno, se utilizó el Espectrofotómetro de Infrarrojos con transformada de Fourier, Perkin Elmer, Spectrus One y el Difractómetro Diferencial de Barrido (DSC) Netzsch 204 F1 Phoenix.
- Reactor batch de 1 litro de capacidad, marca BETRIEBSDRUCK, con calentamiento eléctrico, termocupla, controlador de temperatura, sistema para la colección de productos, el arreglo se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Reactor y sistema de colección utilizado.

- Para los análisis de los productos obtenidos se utilizó un cromatógrafo de gases Varian 3 700 con registrador de datos y un cromatógrafo Perkin Elmer Clarus 5 000 con computador, Analizador de Azufre OXFORD LZ-01P, Destilador Precision Cientific 74 730, refractómetro ATAGO NAR-1T, Analizador de corrosión a la lámina de cobre Koehler Instrument, Balanza analítica ADAM PW 124, Calorímetro Bom Calorimeter Parr, Viscosímetro: 1C A780

Cannon, Mufla Lindberg, con regulador de temperatura de 0 - 1200 °C, Refractómetro ATAGO NAR-1T.

- Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos se utilizó el software Statgraphics Centurion.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterización de la muestra de polietileno

Para la caracterización de la materia prima se utilizaron dos métodos de análisis: calorimetría de barrido diferencial y espectroscopia de infrarrojos.

Ya que se disponía de muestra de polietileno laminada y triturada, se analizaron los dos tipos para determinar si ambas se trataban de polietileno de alta densidad.

En la Tabla 1 se muestran las condiciones utilizadas para el análisis DSC.

Para el análisis por Espectroscopia de infrarrojos por transformadas de Fourier, consiste en transmitir un rayo monocromático de luz infrarroja a través de la muestra, y se registra la cantidad de energía absorbida. De las muestras a analizar, solamente fue necesario preparar la muestra triturada, tomándose 3 gramos de la misma para ser prensada.

2.2.2 Ensayos para la determinación de las variables del proceso

Se llevó a cabo la adecuación del reactor para la realización del proceso de pirolisis de polietileno, además, se realizó la construcción del equipo auxiliar para la recolección de productos.

Se construyó un medidor y controlador de temperatura, ya que el reactor es calentando eléctricamente.

Para el enfriamiento y colección de los productos de la pirolisis de polietileno, se utilizó un condensador de vidrio, acoplado, por un extremo a la salida del reactor, y por el otro, a la boca de un matraz con salida lateral, como se muestra en la Figura 1.

De acuerdo con la información bibliográfica de las condiciones de operación en reactores similares al reactor disponible se determinaron las variables de operación que son: temperatura y tiempo de reacción, se mantuvo como parámetros la cantidad de muestra de acuerdo a la capacidad del reactor, la agitación, presión de trabajo y la ausencia de catalizadores.

Se analizó la influencia de la temperatura y tiempo de reacción en el proceso de pirolisis de 100 g de polietileno, se llevaron a cabo pruebas a 300, 350 y 400 °C, con tiempo de reacción de media hora, una hora y dos horas para cada temperatura.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros utilizados durante el proceso de pirolisis de polietileno, y en la Tabla 3, se muestran las variables de experimentación durante los ensayos de pirolisis.

Condición	Unidad	Muestra Triturada	Muestra laminada
Peso de la muestra	mg	12,12	10,61
Masa de referencia	mg	0,00	0,00
Masa del crisol	mg	39,19	39,92
Masa del crisol de referencia	mg	0,00	0,00
Material del crisol	-	Aluminio	Aluminio
Atmósfera	-	Nitrógeno	Nitrógeno
Velocidad del nitrógeno	ml/min	250,0	250,0
Calentamiento/limite de equilibrio	K	5,0	5,0
Tasa de precalentamiento	K/min	40,00	40,00
Tiempo máximo de equilibrio después del precalentamiento	min	20,0	20,0
Tasa de pre enfriamiento	K/min	30,00	30,00
Tiempo máximo de equilibrio después del preenfriamiento	h	3,00	3,00

Tabla 1. Condiciones utilizadas para el análisis DSC para las muestras suministradas.

Parámetro	Valor
Cantidad de muestra (g)	100
Presión (atm)	0,72

Tabla 2. Parámetros del proceso de pirolisis de polietileno.

Tiempo de reacción (h)	Temperatura (°C)		
	300	350	400
0,5	E1	E2	E3
1,0	E4	E5	E6
2,0	E7	E8	E9

Tabla 3. Variables de experimentación y ensayos de pirolisis de 100 g polietileno triturado.

Se determinó el par temperatura - tiempo de reacción que favorece el proceso mediante la determinación de la producción de gases, líquidos y sólidos, durante la pirolisis. El par de variables seleccionado, fue el que favoreció la producción de productos líquidos. Se complementó este análisis mediante un análisis estadístico ANOVA de la influencia de estas variables sobre el proceso.

El rendimiento de los procesos se determinó mediante la ecuación (1)

$$\eta_{es} = \frac{w_2 - w_1}{w} \times 100 \quad (1)$$

donde

η_{es} : Rendimiento del ensayo de pirolisis respecto a los productos líquidos producidos en la pirolisis, en %.

w : Peso de polietileno pirolizado, en g.

w_1 : Peso del sistema de enfriamiento-colección vacío, en g.

w_2 : Peso del sistema de enfriamiento-colección con los productos colectados, en g.

2.2.3 Tratamiento y análisis de los productos obtenidos

Productos Gaseosos

La composición de los gases se determinó, por cromatografía de gases en el Laboratorio de Análisis Instrumental.

Las condiciones utilizadas para la inyección en el cromatógrafo fueron las siguientes:

Temperatura del detector:	220 °C
Temperatura de la cámara de aireación	50 °C
Gas portador:	Helio
Presión del gas portador:	29,9 psig
Flujo del gas portador:	15,0 l/min

Para la identificación de los hidrocarburos presentes en las muestras se utilizaron los tiempos de retención relativos de cada componente. La composición molar es igual al porcentaje del área del pico formado por cada hidrocarburo en el cromatograma

Productos Líquidos

Los productos líquidos provenientes de la pirolisis de polietileno, fueron destilados en un balón con salida lateral provisto de un multímetro (para el registro de temperatura), una termocupla, un condensador, una probeta y una fuente de calor. Se destilaron hasta la temperatura de 200 °C, que es la temperatura en la cual empieza su descomposición, obteniéndose una parte sólida y una parte líquida a temperatura ambiente. El sistema utilizado se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Sistema utilizado para la destilación de los productos líquidos provenientes de la pirolisis de polietileno.

La composición de los productos líquidos finales, se determinó por cromatografía de gases en el Laboratorio de Análisis Instrumental.

Las condiciones utilizadas para la inyección en el cromatógrafo, fueron las siguientes:

Temperatura del inyector:	220 °C
Temperatura del detector:	220 °C
Temperatura de la columna:	175 °C
Presión del gas portador:	13 psig
Volumen de muestra:	0,2 µl
Velocidad de la carta:	0,5 pulg/min
Atenuación:	512×10^{-11}

Para la identificación de los hidrocarburos presentes en las muestras se utilizaron los tiempos de retención relativos de cada componente. La composición en peso es igual al porcentaje del área del pico formado por cada hidrocarburo en el Cromatograma.

Se determinaron las propiedades físico químicas de los productos líquidos finales, según las normas A.S.T.M respectivas, las propiedades evaluadas se muestran en la Tabla 4.

Ensayo	Método de prueba
Densidad a 15 °C	D1298
Viscosidad a 40 °C	D445
Viscosidad a 60 °C	D445
Contenido de agua por destilación	D4006
Contenido de azufre	D129
Contenido de carbón Conradson	D189
Contenido de cenizas	D482
Corrosión al cobre	D130
Destilación	D86
Punto de acidez	D664

Tabla 4. Ensayos utilizados para la determinación de las propiedades físico químicas y como combustibles de los productos líquidos finales obtenidos.

Se evaluaron propiedades adicionales a los productos líquidos finales, se consideraron los métodos oficiales A.S.T.M. Las propiedades evaluadas se muestran en la Tabla 5.

Ensayo	Método de prueba/referencia
Punto de anilina	D611
Punto de fluidez	D97
Poder calorífico	D3180
Índice de cetano calculado	D976

Tabla 5. Ensayos para determinar las propiedades adicionales.

Se determinó el valor de las siguientes propiedades:

A) Índice de Refracción a 15 °C :

Se determinó el índice de refracción a 15 °C. El procedimiento consistió, en colocar el producto en el porta muestras del refractómetro y leer directamente el índice de refracción. En la Figura 3 se muestra el refractómetro utilizado.



Figura 3. Refractómetro ATAGO NAR-1T.

B) Grados A.P.I:

Los Grados A.P.I del producto, se determinaron mediante la Ecuación [2] [5].

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{SG_{15}^{15}}, \quad (2)$$

donde

$^{\circ}API$: Grados API
 SG_{15}^{15} : Gravedad específica, determinada a 15 °C

C) Concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos:

La concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos se realizó mediante el método de Wuithier [5], denominado también el método n.p.PA, (Índice de refracción, densidad y punto de anilina), con las ecuaciones (3), (5) y (6) respectivamente.

$$\%Ca = 1039,4(n) - 470,4(d) - 0,315(PA) - 1094,3 \quad (3)$$

donde,

Ca : Concentración de carbonos aromáticos, expresado en %
 n : Índice de refracción, determinado a 15 °C.
 d : Densidad relativa, determinada a 15 °C.
 PA : Punto de anilina, °C.

$$\%Cn = -1573,3(n) + 840,15(d) \quad (4)$$

$$-0,4619(PA) + 1662,2. \quad (5)$$

donde,

Cn : Concentración de carbonos nafténicos, expresado en %
 n : Índice de refracción, determinado a 15 °C.
 d : Densidad relativa, determinada a 15 °C.
 PA : Punto de anilina, °C.

$$\%Cp = 100 - (\%Ca + \%Cn). \quad (6)$$

donde,

Cp : Concentración de carbonos parafínicos, expresado en %.
 n : Índice de refracción.
 d : Densidad relativa, determinada a 15 °C.
 PA : Punto de anilina, °C.

D) Presión, temperatura y volumen críticos, factor acéntrico [6]:

La correlación mostrada en la ecuación (7), está basada sobre datos experimentales y usa cuatro coeficientes *a*, *b*, *c* y *d*, para correlacionar las diferentes variables para poder predecir las propiedades de las fracciones de petróleo. Estos coeficientes son determinados numéricamente, por el método de mínimos cuadrados para seleccionar el conjunto de coeficientes, para una determinada propiedad.

La ecuación (8) puede ser usada para determinar el valor de *Y*, la cual puede ser peso molecular (g/mol), la presión crítica (kPa), temperatura crítica (K), el volumen crítico (m³/kgmol) y el factor acéntrico de los compuestos y de las fracciones de petróleo.

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad (7)$$

$$X = SG_{15}^{15} \times MABP, \quad (8)$$

donde,

a, b, c, d: Coeficientes experimentales
 SG_{15}^{15} : Gravedad específica, determinada a 15 °C.
 MABP: Punto de ebullición medio, expresado en grados Kelvin (K).

Productos sólidos

En los productos sólidos obtenidos en la pirolisis de polietileno, se determinó el contenido de carbón y el contenido de cenizas.

Para determinar la cantidad de carbón presente en los productos sólidos, se pesó de 3,0 a 3,5 g de muestra en un crisol de porcelana previamente tarado.

Se colocó el crisol en la mufla a una temperatura de 400 °C por cuatro horas. La muestra se enfrió a temperatura ambiente en un desecador. Se pesó el crisol con la muestra carbonizada, y se obtuvo el peso del carbón y las cenizas presentes en la muestra original.

El contenido de carbón se determinó mediante la ecuación (9).

$$M_1 = M_2 - M_3, \quad (9)$$

donde,

M_1 : Cantidad de carbón, expresada en g.
 M_2 : Cantidad de cenizas y carbón, expresada en g.
 M_3 : Cantidad de cenizas, expresada en g.

Se determinó el porcentaje de carbón en la muestra mediante la ecuación (10)

$$\%Carbón = \frac{M_1}{M} \cdot 100. \quad (10)$$

Donde:

%C : Cantidad de carbón presente en la muestra, expresada en %.

M_1 : Cantidad de carbón, expresada en g.

M : Peso de la muestra colocada en el crisol, expresada en g.

Se determinó el porcentaje de cenizas en la muestra mediante la ecuación (11)

$$\% \text{Cenizas} = \frac{M_3}{M} \cdot 100. \quad (11)$$

Donde:

M : Peso de la muestra colocada en el crisol, expresada en g.

M_3 : Cantidad de cenizas, expresada en g.

3 Análisis

De los análisis realizados a las muestras de polietileno, para la determinación de su naturaleza, mediante la Calorimetría diferencial de barrido y Espectrofotometría de Infrarrojos. Se puede asegurar, que la muestra de polietileno a utilizar en los ensayos de pirolisis, corresponde a polietileno de alta densidad.

Con base en los resultados obtenidos al determinar los rendimientos del proceso de pirolisis, respecto a los productos líquidos, en las diferentes condiciones utilizadas en el proceso y el análisis estadístico, se optimiza la producción de productos líquidos si la temperatura de reacción es de 400 °C y el tiempo de reacción es 2 horas, siendo estas las condiciones óptimas con una diferencia significativa al resto de condiciones analizadas

El objetivo de pirolizar polietileno de desecho de las bananeras fue el obtener hidrocarburos líquidos, que puedan ser utilizados como combustibles y de esta manera puedan ser comparados con los de origen fósil, por esta razón se determinó el rendimiento total de la pirolisis respecto a los productos líquidos finales o hidrocarburos líquidos al par temperatura- tiempo de reacción seleccionados en el proceso experimental.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos:

Producto	Rendimiento promedio (%)
Productos líquidos finales	32,64

Tabla 6. Rendimiento total promedio de la pirolisis con respecto a los hidrocarburos líquidos obtenidos.

3.1 Productos gaseosos

Durante la pirolisis a 400 °C, se tomaron muestras, a una y dos horas.

La Tabla 7 muestra los componentes determinados en los gases producidos durante la pirolisis de polietileno con un tiempo de reacción igual a 1 hora.

La Tabla 8 muestra los componentes determinados en los gases producidos durante la pirolisis de polietileno con tiempo de reacción igual a 2 horas.

Compuesto	Tiempo de retención	Proporción (%)
	0,256	0,10
	0,643	0,01
	0,681	0,02
N ₂	0,784	1,94
CH ₄	0,841	2,16
CO ₂	1,180	6,72
	2,675	1,78
C ₂ H ₆	3,893	0,00
	4,122	7,30
	4,917	14,62
	8,659	10,20
H ₂ O	8,889	28,94
i-C ₄	13,339	7,20
n-C ₄	13,695	12,24
C ₅	15,467	0,25

Tabla 7. Composición molar de los gases de la pirolisis de polietileno a 400 °C, tiempo de reacción 1 hora, analizado por cromatografía de gases.

Compuesto	Tiempo de retención	Proporción (%)
	0,251	0,18
	0,639	0,03
N ₂	0,764	8,18
CH ₄	1,184	7,92
CO ₂	2,724	0,97
	4,171	6,35
C ₂ H ₆	4,930	16,36
	8,720	9,79
H ₂ O	8,950	27,70
i-C ₄	13,390	6,75
n-C ₄	13,737	10,72
C ₅	16,977	2,18

Tabla 8. Composición molar de los gases de la pirolisis de polietileno a 400 °C, tiempo de reacción 2 horas, analizado por cromatografía de gases.

Como se nota en las tablas 6 y 7, existen compuestos que no pudieron ser identificados por falta de estándares.

La presencia de nitrógeno, indica que dentro del sistema existía aire al momento de cerrar el reactor. La presencia de dióxido de carbono y agua indica que además del proceso de pirolisis, existe un proceso de combustión de la muestra en el reactor. La disminución de la cantidad de dióxido de carbono con el tiempo, indica que el proceso de combustión decrece con el tiempo.

3.2 Productos líquidos

Los productos líquidos destilados fueron colectados y analizados en un cromatógrafo de gases. En la Figura 4 se muestra el Cromatograma de los productos de líquidos finales obtenidos por destilación de los productos líquidos, provenientes de la pirolisis de polietileno (productos líquidos y semi líquidos producidos de la pirolisis de polietileno). Los productos líquidos finales obtenidos

por destilación hasta una temperatura de 200 °C, contienen cadenas de carbonos desde C₁₀ hasta C₂₇. Pasada esta temperatura, la muestra empieza a descomponerse en el balón de destilación.

Tomando en cuenta que la gasolina contiene cadenas de carbonos entre C₅ y C₁₀, que el kerosene contiene entre C₁₀ y C₁₆ y que el diesel contiene entre C₁₄ y C₂₀, entonces, el producto obtenido contiene compuestos correspondientes a gasolina, kerosene y diesel.

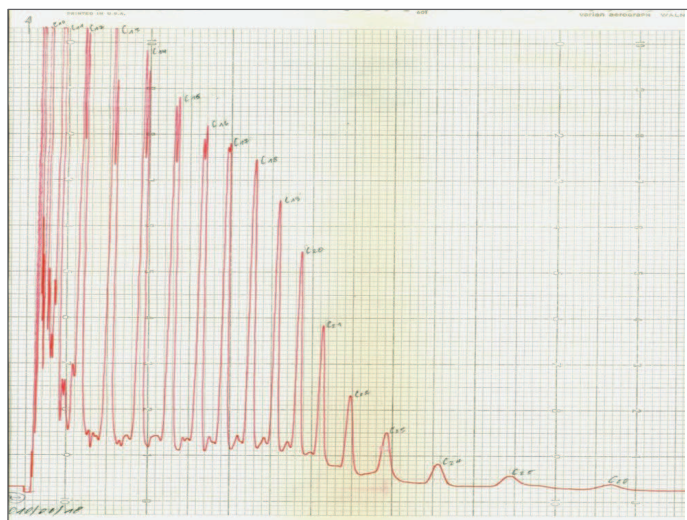


Figura 4. Cromatograma de los productos líquidos finales obtenidos por la pirolisis de polietileno a 400 °C y 2 horas.

En las tablas 9, 10 y 11, se muestran los valores de las propiedades determinadas de los productos líquidos finales.

Las propiedades calculadas conforme se indicó en la sección 2.2 se muestran en la tabla 9.

Ensayo	Método de prueba/referencia	Valor
Grados A.P.I	Wuithier, 1971	54,73
Índice de cetano	Maples, 2000	43,35
Concentración de carbonos aromáticos	Wuithier, 1971	21,09 %
Concentración de carbonos nafténicos	Wuithier, 1971	15,74 %
Concentración de carbonos parafínicos	Wuithier, 1971	63,19 %
Peso molecular aproximado	Bahadori y Mokhatab, 2008	132,866 g/mol
Presión crítica aproximada	Bahadori y Mokhatab, 2008	2,492 kPa
Temperatura crítica aproximada	Bahadori y Mokhatab, 2008	607,778 K
Volumen crítico aproximado	Bahadori y Mokhatab, 2008	0,528 m ³ /kgmol
Factor acéntrico	Bahadori y Mokhatab, 2008	0,380

Tabla 9. Propiedades calculadas del producto líquido final obtenido de la pirolisis de polietileno a 400 °C por 2 horas

Ensayo	Método de prueba/referencia	Valor
Punto de anilina	A.S.T.M D611	59 °C
Punto de fluidez	A.S.T.M D97	-27 °C
Poder calorífico	A.S.T.M D3180	56.790 J/g
Índice de refracción a 15 °C	-	1,4345

Tabla 10. Propiedades adicionales de los productos líquidos finales obtenidos de la pirolisis de polietileno a 400 °C por 2 horas

Ensayo	Método de prueba	Valor
Densidad a 15 °C	D1298	0,759 g/ml
Viscosidad a 40 °C	D445	0,957 cSt
Viscosidad a 60 °C	D445	0,919 cSt
Contenido de agua por destilación	D4006	No Detectable
Contenido de azufre	D129	0,004 %
Contenido de carbón Conradson	D189	0,23 %
Contenido de cenizas	D482	0,005 %
Corrosión al cobre	D130	1 b
Destilación	D86	73 – 295 °C
Punto de acidez	D664	0,202 mgKOH/g

Tabla 11. Propiedades físico químicas de los productos líquidos finales obtenidos de la pirolisis de polietileno a 400 °C por 2 horas.

El punto de anilina y el índice de refracción, sirven como valores para la determinación del índice de cetano y el contenido de carbonos aromáticos, parafínicos y nafténicos, respectivamente.

3.3 Productos sólidos

Los productos sólidos obtenidos por pirolisis de polietileno, que fueron sometidos a procesos térmicos, para determinar su contenido de carbón y cenizas, como se mencionó en la sección 2.2. En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos.

Ítem	Contenido de Carbón (%)	Contenido de Cenizas (%)
Residuo sólido de la pirolisis de polietileno	4,65	9,37

Tabla 12. Contenido de carbón y cenizas de los productos sólidos de la pirolisis de polietileno.

El contenido de carbón en los productos sólidos, y conforme al contenido de dióxido de carbono evidenciado en los productos gaseosos producidos en la pirolisis de polietileno, confirman un proceso paralelo de combustión durante el proceso de pirolisis.

El contenido de cenizas presente en los productos sólidos, pueden deberse a los aditivos colocados en la materia prima como colorantes, estabilizantes, etc.

4 Conclusiones

1. El material provisto para este estudio, analizado por DSC y Espectroscopia de Infrarrojos, fue polietileno de alta densidad.
2. Los productos del proceso de pirolisis de polietileno de alta densidad, se encuentran en estado sólido, líquido y gaseoso.
3. A temperaturas comprendidas entre los 250 y 300 °C, no se obtienen productos líquidos y semi líquidos (productos líquidos), sino que el material se funde en el fondo del reactor.
4. La proporción de los productos sólidos, líquidos y gaseosos, no solo depende de la temperatura de pirolisis, sino también del tiempo total de reacción.
5. A una temperatura de pirolisis de 400 °C, y media hora de tiempo de reacción, los componentes mayoritarios son los productos sólidos, 51,15%; cuando el tiempo de reacción es de una y dos horas, los productos líquidos son los componentes mayoritarios, 66,27% y 76,72% en promedio, respectivamente.

6. El par temperatura–tiempo de reacción que produce la mayor cantidad de productos líquidos es 400 °C y 2 horas, respectivamente, obteniéndose 76,72% de productos líquidos.
7. El rendimiento total del proceso de pirolisis de polietileno para la producción de combustibles líquidos, después de la destilación a una temperatura máxima de 200 °C, fue de 32,64%.

Referencias

- [1] Organización Panamericana de la Salud, 2002. *Análisis sectorial de residuos sólidos Ecuador*. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsars/e/fulltext/analisis/ecuador.pdf>, (mayo, 2011)
- [2] Quirola, A., Saltos, V. y Centeno, V., 2010. *Proyecto de producción y comercialización de perfiles plásticos a base de materia prima reciclada para compañías exportadoras de banano en la ciudad de Guayaquil*. <http://repositorio.cladea.org/bitstream/123456789/242/1/D-43080.pdf>, (marzo, 2011)
- [3] Ademiluyi, T. y Akpan, C., 2007. *Preliminary evaluation of fuel oil produced from pyrolysis of waste water sachets*. <http://www.bioline.org.br/request?ja07078>, (marzo, 2011)
- [4] Walendziewski, J., 2006. *Thermal and Catalytic conversion of polyolefins*. en Scheirs, J. y Kaminsky, W. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastic into Diesel and Other Fuels*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, Reino Unido, pp. 113, 114, 117, 139.
- [5] Wuithier, P., 1971. *El Petróleo, Refino y Tratamiento Químico*. Tomo 1, Ediciones Cepsa, Barcelona, España, pp. 3 - 34.
- [6] Bahadori, A. y Mokhatab, S., 2008. *Predicting Physical Properties of Hydrocarbon Compounds*. Chemical Engineering, 115(8), p 46.
- [7] Buekens, A., 2006. *Introduction into Feedstock Recycling of Plastics*. en Scheirs, J. y Kaminsky, W. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastic into Diesel and Other Fuels*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, Reino Unido, pp. 8, 9, 13, 16.
- [8] Romo, L., 1973. *Métodos de experimentación científica*. Editorial Universitaria, Ecuador, pp. 280 - 293.
- [9] Saechtling, H. y Woebcken, W., 1995. *International Plastics Handbook for the Technologist, Engineer and User*. 3ra edición, Hanser Publisser, Cincinnati, Estados Unidos, p. 183.