

Evaluación de la pirólisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch

Mora M.*, Albuja M.*, Proaño O.*

Laboratorio de Operaciones Unitarias, Departamento de Ingeniería Química
marcelo.albuja@epn.edu.ec

Resumen.- En el presente proyecto se evalúa la utilidad del aceite vegetal que ha sido desechado después de su uso en la preparación de alimentos, para la obtención de productos combustibles mediante el proceso térmico anaerobio denominado pirólisis. El aceite vegetal de desecho fue sometido a un proceso de filtración para eliminar las impurezas y se realizó su caracterización para determinar sus propiedades. Se estudiaron diversas variables tales como agitación, catalizador, tiempo de residencia y temperatura para obtener un alto rendimiento. Al cuantificar los productos obtenidos de la pirólisis, se establecieron las mejores condiciones de operación: 400 °C durante 90 min obteniéndose un rendimiento del producto líquido igual al 62,63 % sin agitación ni catalizador. El producto de la pirólisis fue destilado durante 90 min hasta que alcanzó una temperatura máxima de 274 °C para la obtención de biocombustible y se analizaron sus propiedades fisicoquímicas tales como punto de inflamación: 51,6 °C; contenido de agua: 0,2 mL de agua por cada 50 mL de biocombustible; residuo carbón Conradson: 1,15 % en peso; cenizas: 0,0078 % en peso; temperatura de destilación del 90 %: 286,20 °C; viscosidad cinemática a 37,8 °C: 2,72 cSt; azufre: 0,0032 % en peso; corrosión a la lámina de cobre: 1a; índice de cetano calculado: 31,56; densidad a 15 °C: 0,8665 g por cm³; punto de nube: -4 °C; número de acidez: 257,66 mg de KOH por g de biocombustible; contenido de fósforo: 119,04 mg de fósforo por kg de biocombustible; contenido de calcio, magnesio, sodio y potasio: 1,62, 0,47, 0,75, 0,19 mg por L de biocombustible respectivamente; poder calorífico: 37 210,46 J por g de biocombustible; índice de yodo: 48,97 cg de yodo por g de biocombustible; número de cetano: 28,14. Los valores obtenidos de las propiedades indicadas sugirieron que se obtuvo un combustible con características similares al diesel No.2 en concordancia con la norma nacional respectiva.

Palabras claves: Pirólisis, aceite vegetal de desecho, reactor batch, biocombustible, diesel No.2.

Abstract.- The utility of waste vegetable oil, which has been discarded after use in food preparation, to obtain combustion products through anaerobic thermal process called pyrolysis, has been done. Waste vegetable oil was subjected to a filtration process to remove impurities and characterization was performed to determine their properties. After preliminary tests in which several variables were studied such as agitation, catalyst, residence time and temperature in order to achieve high performance in the pyrolysis of waste vegetable oil and to quantify the products obtained. Best operating conditions of the pyrolysis process were: 400 °C for 90 min with a yield of 62,63 % liquid product without agitation or catalyst. The product obtained from the pyrolysis was distilled for 90 min until it reached a maximum temperature of 274 °C for obtaining biofuels and analyzed their physicochemical properties such as flash point: 51,6 °C; water content: 0,2 mL of water for every 50 mL of biofuel; Conradson carbon residue: 1,15 % by weight, ash: 0,0078 % by weight; distillation temperature of 90 %: 286,20 °C; kinematic viscosity at 37,8 °C: 2,72 cSt; sulfur: 0,0032 % by weight; corrosion to the copper foil: 1a; calculated cetane index: 31,56; density at 15 °C: 0,8665 g per cm³; cloud point: -4 °C; acid number: 257,66 mg KOH per g of biofuel; phosphorus content: 119,04 mg of phosphorus per kg of biofuel; calcium, magnesium, sodium and potassium: 1,62, 0,47, 0,75, 0,19 mg per L of biofuel respectively; calorific value: 37 210,46 J per g of biofuel, iodine: 48,97 iodine cg per g of biofuel; cetane number: 28,14. From the properties results a fuel with similar characteristics to diesel No.2 in accordance with the national standard for No.2 diesel was obtained.

Key words: Pyrolysis, waste vegetable oil, batch reactor, biofuel, diesel No.2.

1. INTRODUCCIÓN

El aceite vegetal de desecho (AVD), es un tipo de biomasa líquida que proviene de las frituras de alimentos.

Los aceites vegetales de desecho constituyen un problema medioambiental y de salud pública puesto que contribuyen a la reproducción de potenciales bacterias nocivas en las

cañerías, obstrucción de las mismas al solidificarse y generación de malos olores. Un litro de aceite doméstico puede contaminar mil litros de agua y provocar importantes alteraciones en los ecosistemas naturales (Intelifuel, 2012, p. 1).

El AVD es una de las alternativas para la producción de biocombustibles. Entre las ventajas del uso de estos desechos se considera la producción de combustibles de

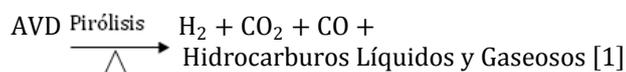
una fuente diferente al de origen fósil y una mejor disposición final al eliminar un residuo contaminante que afecta al suelo y agua (Tirado, 2010, p. 10).

Los aceites vegetales de desecho contienen ácidos grasos, fosfolípidos, sales e impurezas, lo que dificulta su utilización directamente como combustibles, principalmente debido a la elevada viscosidad que poseen, por lo que necesitan modificarse químicamente; para esto existen diferentes procesos como la transesterificación, la pirólisis, la microemulsificación, etc. (Dupont, Suarez, Meneghetti y Meneghetti, 2009, p. 3).

El enfoque de este estudio es el proceso de pirólisis con el que se logrará que largas cadenas ramificadas iniciales de triglicéridos, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono, se transformen en cadenas lineales, de menor viscosidad y porcentaje de carbono, cuyas características fisicoquímicas y energéticas sean similares a las del diesel. El biocombustible obtenido se puede utilizar puro o mezclado en distintas proporciones junto con el diesel (Miliarium, 2011, p.1).

Se ha reportado que la pirólisis de biomasa de desechos industriales y domésticos es un proceso atractivo para solucionar el incremento de la demanda de combustibles y por razones ecológicas, sociales y económicas es una alternativa para obtener combustibles (Lima, Soares, Ribeiro, Carvalho, Cardoso, Rassi, Mundim, Rubim y Suarez, 2004, p. 987).

Según Demirbas (2006), la reacción de pirólisis para el AVD se presenta en la Ecuación 1 (p. 14).



El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, MEER, a través de la Dirección Nacional de Biocombustibles con el apoyo de la Agencia de Cooperación Alemana GIZ, está desarrollando el Proyecto Piñón para Galápagos, dentro de la iniciativa “Cero combustibles fósiles en las Islas Galápagos”, que busca eliminar el uso de combustibles fósiles en el Archipiélago al reemplazarlos usando aceites vegetales provenientes de cultivos no aptos para el consumo y que han sido sometidos a procesos previos hasta obtener combustibles para reducir la contaminación ambiental causada por derrames de los mismos (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2011).

En el Ecuador la nueva constitución que rige desde el 2008 establece que el gobierno está obligado a dar prioridad e impulsar la utilización y generación de la energía renovable en el sector público y privado por lo que el MEER creó el Plan del Buen Vivir y mediante el cual la producción y distribución del consumo de energía deben basarse en fuentes de energía renovable y eficiente. Además, se ha considerado que el Ecuador cuenta desde el primero de enero del 2013 con una nueva ley de Regulación sobre precios referenciales para la energía

producida con Recursos Energéticos Renovables no Convencionales bajo el ejemplo de la ley alemana (Cámara de Industrias y Comercio Ecuatoriano - Alemana, 2011, p. 23).

El presente estudio otorga una respuesta a la creciente necesidad de buscar alternativas para el aprovechamiento de estos desechos que contaminan el ambiente.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Materiales y Equipos

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron reactivos y equipos de los Laboratorios de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional para la realización de los ensayos preliminares de pirólisis, la caracterización del AVD y los análisis fisicoquímicos de los productos obtenidos.

Los reactivos utilizados fueron: etanol, éter etílico, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, éter de petróleo, yoduro de potasio, tiosulfato de sodio, cloroformo, tetracloruro de carbono, ácido acético glacial, ácido periódico, óxido de zinc, ácido clorhídrico, sulfato de hidracina, molibdato de sodio, xileno, dicromato de potasio, entre otros.

Los equipos utilizados fueron: reactor batch BAUJAHR, balanza analítica ADAM, mufla LINDBERG, estufa HERAEUS, espectrofotómetro de fluorescencia OXFORD, refractómetro ATAGO, cromatógrafo de gases PERKIN ELMER (muestra gaseosa), cromatógrafo de gases VARIAN MODEL (muestra líquida), espectrofotómetro de absorción atómica AA ANALYST, entre otros.

2.1.1. Materia prima

El aceite vegetal de desecho fue la materia prima utilizada para obtener biocombustible y fue proporcionado por restaurantes en la ciudad de Quito.

Previo a todo ensayo el AVD fue filtrado con un tamiz para la eliminación de impurezas sólidas, y fue caracterizado mediante varios análisis con base en las normas INEN, ASTM, EN (Normas europeas del Comité Europeo de Normalización) y A.O.C.S (Norma de la Sociedad Química Americana de aceites) con ciertas modificaciones y se indican en la Tabla 1. Posteriormente el AVD fue sometido a un proceso de pirólisis del que se obtuvo el bio-aceite (producto pirolítico) que fue destilado para la obtención de biocombustible.

Tabla 1. Normas utilizadas en la caracterización del aceite vegetal de desecho

ENSAYO	NORMA
Índice de refracción	INEN 42
Índice de acidez	INEN 38
Índice de saponificación	INEN 40
Materia insaponificable	INEN 41
Índice de rancidez	Cox y Pearson, 1962, pp. 421 – 422
Índice de yodo	INEN 37
Poder calórico	ASTM D-3180
Punto de nube, de escurrimiento y de solidificación	Holguín, 1981, pp. 46 – 47
Estabilidad a la oxidación	EN 14112
Glicerina total	A.O.C.S 124 – 56
Glicerina libre	A.O.C.S 124 – 56
Glicerina combinada	A.O.C.S 124 – 56
Contenido de fósforo	A.O.C.S 12 – 55

2.2. Ensayos preliminares para la determinación de las variables y rendimiento del proceso de pirólisis del aceite vegetal de desecho

Los ensayos preliminares realizados sirvieron para determinar la influencia de distintas variables como temperatura, tiempo de residencia, agitación y catalizador para establecer las condiciones óptimas del proceso de pirólisis con las que se obtendría mayor cantidad de producto líquido (bio-aceite).

Se realizaron ensayos por duplicado con temperaturas set de 350, 400 y 420 °C, dichas temperaturas fueron distintas a las temperaturas de operación alcanzadas durante el proceso, el tiempo de residencia de 75, 80, 90 y 140 min, el uso decarbonato de sodio como catalizador (1 % del total de la muestra) y la agitación. Se varió la cantidad de muestra de 300, 350 y 400 mL.

El procedimiento de los ensayos preliminares de pirólisis de AVD fue:

- Previo a todo el proceso se pesaron todos los materiales de laboratorio y las muestras de AVD: 300, 350 y 400 mL, necesarios en cada ensayo para realizar el balance de masa de los productos obtenidos.
- En los ensayos que se utilizó catalizador, se pesó el 1% del catalizador, respecto del peso total de la muestra de aceite, se mezcló con el AVD y se colocó en el reactor.
- Se armó el equipo para pirólisis con agitación y sin agitación para determinar su influencia en el proceso, como se indica en la Fig. 1.

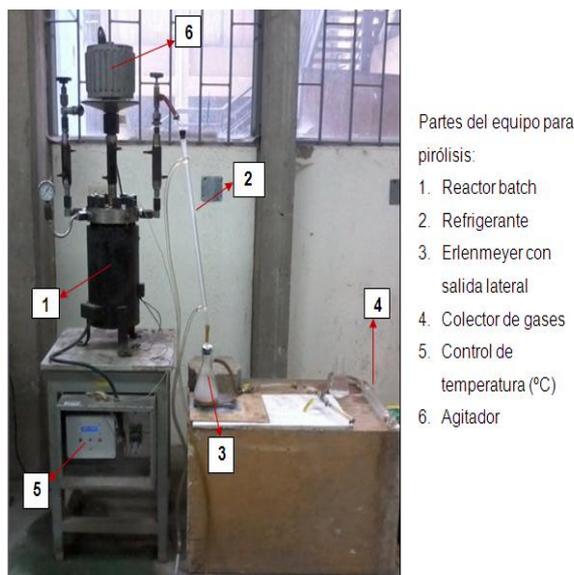


Figura 1. Equipo para pirólisis de aceite vegetal de desecho

- Se realizaron ensayos de pirólisis con temperaturas alcanzadas en el reactor de 350 y 400°C, y con tiempos de 75, 80, 90 y 140 min para evitar la carbonización del aceite y así determinar la temperatura y el tiempo de operación que favorecían el rendimiento del proceso, así como la influencia del uso o no de agitación y catalizador.
- Durante la pirólisis se midió la temperatura de salida y se comprobó la presencia de hidrocarburos gaseosos en el producto a la salida del colector de gases.
- Se recolectó el residuo del aceite que quedó en el interior del reactor. Los productos y el residuo se pesaron al terminar cada ensayo y se efectuó el balance de masa.
- Se determinó el rendimiento del proceso de pirólisis con respecto al producto líquido (bio-aceite) y se establecieron las mejores condiciones de operación en las que se obtiene el producto deseado.

2.3. Ensayos de pirólisis de aceite vegetal de desecho

Una vez establecidas las mejores condiciones de operación para obtener la mayor cantidad de producto líquido del proceso de pirólisis del AVD mediante los ensayos preliminares, se ejecutaron los ensayos de destilación del producto pirolítico (bio-aceite) para la producción de biocombustible.

2.3.1. Descripción de los ensayos de pirólisis de aceite vegetal de desecho

Se usó el mismo procedimiento descrito en los ensayos preliminares de pirólisis de AVD pero con las condiciones de operación establecidas para la obtención del bio-aceite. Los productos y el residuo obtenidos se pesaron al terminar cada ensayo y se efectuó el balance de masa correspondiente.

El peso de los productos gaseosos se obtuvo por diferencia mediante la Ecuación 2.

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = 0$$

Se tiene:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad [2]$$

Donde:

Entrada: Peso del aceite que ingresa al proceso, en g.

Salida: Peso del producto líquido del proceso, en g.

Salida: Peso del residuo que sale del proceso, en g.

Salida: Peso del gas que sale del proceso, en g.

Se calculó el rendimiento del proceso de pirólisis de AVD con respecto al producto líquido mediante la Ecuación 3.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Salida (g)}}{\text{Entrada (g)}} \times 100 \quad [3]$$

Luego del proceso de pirólisis, se destiló el producto líquido que se obtuvo en cada ensayo para la elaboración del biocombustible.

2.4. Descripción de los ensayos preliminares de la destilación del producto de pirólisis

Se realizaron varias destilaciones con todo el producto líquido proveniente de cada ensayo de pirólisis de AVD.

- Se pesaron los materiales de laboratorio y las muestras de bio-aceite antes de realizar cada ensayo de destilación.
- Se armó el equipo para destilar como se indica en la Fig. 2, y durante el proceso cada 5 min se midieron las temperaturas.
- Se obtuvo como destilado un producto líquido (biocombustible) y un residuo.



Partes del equipo de destilación para obtención de biocombustible:

1. Balón de destilación
2. Refrigerante Liebig
3. Camisa de calentamiento
4. Multímetro para medición de temperatura
5. Erlenmeyer para recolección de biocombustible

Figura 2. Equipo de destilación utilizado para la obtención de biocombustible

2.5. Análisis fisicoquímicos de los productos obtenidos de la destilación del bio-aceite provenientes de la pirólisis de aceite vegetal de desecho

Los productos que se obtuvieron con base en la pirólisis del AVD y su posterior destilación fueron analizados para determinar sus características y similitud con el diesel No. 2.

Los análisis realizados al biocombustible se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis fisicoquímicos realizados al biocombustible

ENSAYO	NORMA
Punto de inflamación (°C)	INEN 1047
Contenido de agua	ASTM D 95-83
Residuo de carbón Conradson (% peso)	INEN 1491
Cenizas (% peso)	INEN 1492
Densidad a 15 °C	ASTM D-1298
Viscosidad cinemática a 37,8 °C (cSt)	INEN 810
Azufre (% peso)	INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	INEN 927
Temperatura de destilación del 90% (°C)	INEN 926
Índice de cetano calculado	INEN 1495
Número de cetano	Maples, 1993, p. 304
Contenido de Na, K, Ca y Mg	LAB. DEMEX
Índice de ácido	INEN 38
Índice de yodo	INEN 37
Poder calórico	ASTM D-3180
Punto de nube	Holguín, 1981
Estabilidad a la oxidación	EN 14112
Contenido de fósforo	A.O.C.S 12 – 55

El biocombustible obtenido fue analizado por cromatografía de gases para identificar los hidrocarburos líquidos presentes en la muestra. Para este análisis el estándar que fue inyectado al cromatógrafo de gases de columna empacada Chromosorb con detector de ionización de llama y nitrógeno como gas portador, fue una mezcla de hidrocarburos lineales: decano, dodecano, tetradecano, hexadecano y octadecano.

En los productos sólidos se analizó el contenido de carbón y cenizas.

En los productos gaseosos provenientes de la pirólisis de AVD recolectados en el colector de gases, se analizó su composición cualitativa y cuantitativa mediante cromatografía de gases de columna empacada Poparak con detector de conductividad térmica y helio como gas portador.

2.5.1. Cuantificación del color del aceite vegetal de desecho, bio-aceite y biocombustible

Para establecer una relación de colores entre la materia prima utilizada, el bio-aceite (producto pirolítico) y el biocombustible obtenido, según Meecr (2009, p. 1) en la Tabla 3 se indican la cuantificación y los cambios del color de un aceite. El color del aceite depende del corte de extracción y mientras el aceite se oscurece su calidad disminuye.

Tabla 3. Cuantificación del color del aceite

Nº comparador de color	Color	Condición del aceite
0,0 – 0,5	Claro	Aceite nuevo
0,5 – 1,0	Amarillo pálido	Buen aceite
1,0 – 2,5	Amarillo	Aceite con tiempo de servicio
2,5 – 4,0	Amarillo brillante	Condiciones marginales
4,0 – 5,5	Ámbar	Mala condición
5,5 – 7,0	Marrón	Condición crítica (necesita regeneración)
7,0 – 8,5	Marrón oscuro	Condición extrema (necesita ser cambiado)

(Meecr, 2009, p. 1)

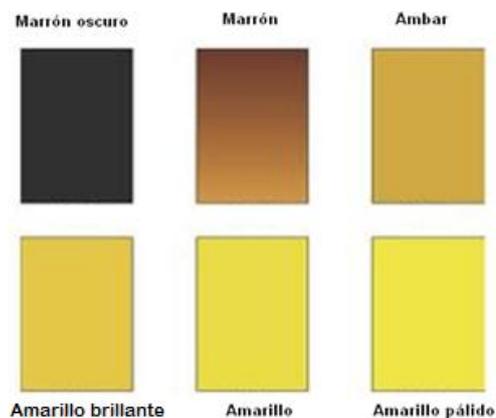


Figura 3. Cuantificación del aceite (Meecr, 2009, p. 1)

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de los análisis del aceite vegetal de desecho

El aceite vegetal de desecho que se utilizó como materia prima para la obtención de biocombustible fue sometido a varios análisis para determinar las condiciones adecuadas.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de los análisis realizados para caracterizar la muestra de AVD

que se consiguió y del cual se desea obtener el biocombustible.

Al analizar en conjunto todas las características del AVD se determinó que puede ser utilizado como materia prima para la obtención de biocombustible, ya que se observó que el AVD debido a su bajo grado de insaturación, elevada capacidad de desdoblamiento en ácidos y glicerina, y su poca formación de sedimentosson características favorables para esta aplicación.

Tabla 4. Resultados de los análisis para caracterizar el aceite vegetal de desecho

Ensayo	Valor obtenido
Índice de refracción	1,473
Índice de acidez (mg KOH/g aceite)	2,02
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	389,19
Materia insaponificable(g aceite - % masa)	0,04 – 1,69
Índice de rancidez	26,8; Aceite rancio
Cantidad de oxígeno (mEq O ₂ /kg aceite)	53,6
Índice de yodo (cg yodo/g aceite)	70,22
Punto de nube (°C)	3
Punto de escurrimiento (°C)	-2
Punto de solidificación (°C)	-3
Poder calórico (J/g aceite)	0
Estabilidad a la oxidación 110 °C, 6 h	Ausencia de gomas
Glicerina total (% masa)	6,76
Glicerina libre (% masa)	0,02
Glicerina combinada (% masa)	6,74
Contenido de fósforo(mg P/kg aceite)	494,44

3.2 Resultados de los ensayos preliminares para la determinación de las variables y rendimiento del proceso de pirólisis de aceite vegetal de desecho

En la Tabla 5 se presentan los resultados que se obtuvieron en cada uno de los ensayos que se efectuaron.

No fue conveniente el uso de catalizador ya que la materia prima utilizada fue aceite vegetal de desecho y no aceite vegetal puro, debido a la generación de CO₂ (que constituye un veneno para el catalizador) en el proceso de pirólisis, el catalizador se inactivó de forma irreversible. La agitación no fue un factor importante en el proceso ya sea que se utilizó o no catalizador puesto que se observó la formación de masas compactas durante su uso, debido a esto se suspendieron los ensayos con catalizador y agitación.

El tiempo fue un factor importante en el proceso de pirólisis puesto que a tiempos bajos no se produjo la

pirólisis completa del aceite vegetal de desecho y tiempos demasiado altos causaron la carbonización de la materia prima.

Cuando se trabajó a temperatura set de 420 °C en el interior del reactor quedó poco residuo y se produjo una mínima cantidad de hidrocarburos gaseosos mientras que, a temperatura set de 400 °C fue alta la cantidad de producto líquido pero aún se debía elevar la temperatura para disminuir la cantidad de residuo. En este ensayo se obtuvo el producto deseado para su posterior destilación y comparación con las propiedades del diesel.

Se notó que la temperatura también fue un factor muy importante en cada ensayo ya que bajas temperaturas no proporcionaron el producto deseado (bio-aceite o producto pirolítico) y a temperaturas demasiado altas, la materia prima se carbonizó, es decir estuvo directamente relacionada con el tiempo de duración del proceso de pirólisis. Cuando se observó que al trabajar con temperaturas bajas y tiempos cortos no se obtenía el producto deseado para la destilación también se simplificaron estos ensayos.

Las mejores condiciones de operación del proceso de pirólisis se produjeron en el quinto ensayo que, se desarrolló con 400 mL de aceite vegetal de desecho durante 90 min a 420 °C (T set) y temperatura de operación del proceso de 400 °C, sin agitación ni catalizador.

Establecidas las condiciones de operación de proceso de pirólisis con la cantidad de AVD que se manejaría en los ensayos posteriores de pirólisis para obtener la cantidad necesaria de bio-aceite que sería destilado y a partir del cual se desea producir biocombustible con características similares a los combustibles fósiles, se continuó con los ensayos preliminares de destilación.

Tabla 5. Determinación de la influencia de temperatura, tiempo de residencia, agitación y catalizador en el proceso de pirólisis de aceite vegetal de desecho

No. Ensayo	V (mL)	Catalizador 1% (g NaCO ₃)	Agitación	Tiempo (min)	Temperatura set (°C)	Salida de producto líquido
1a	350	3,16	Sí	90	400	Queda una masa compacta en el interior del reactor y en el agitador
1b	350	< al 1 %: 1,58	Sí	90	400	Se forma una masa en el interior del reactor, no sale producto
2a	400	3,62	No	140	400	Sale poco producto, el aceite se quema en el interior del reactor
2b	400	No	No	140	400	Sale poco producto, aún se quema aceite en el interior del reactor
3a	300	No	Sí	80	420	Sale poco producto, se queda el aceite en el agitador
3b	300	No	No	80	420	Sale producto pero aún se queda aceite en el interior del reactor
4a	300	No	No	75	420	Sale producto pero el tiempo no es suficiente
4b	300	No	No	75	400	Sale producto pero se debe incrementar la temperatura
5a	400	No	No	90	420	Sale producto y queda poco residuo en el interior del reactor
5b	400	No	No	90	400	Sale producto, se debe incrementar la temperatura para disminuir el residuo
6a	400	No	No	90	350	No sale producto líquido solamente gas, se debe incrementar la temperatura
6b	300	No	No	90	350	No sale producto líquido solamente gas y hay un incremento del residuo en el interior del reactor

3.3 Resultados de los ensayos preliminares realizados para la destilación del producto proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho

En el proceso de destilación del producto proveniente de la pirólisis de AVD la condición ensayada fue el nivel de calentamiento de la chaqueta necesario para alcanzar una destilación completa.

La chaqueta de calentamiento tenía tres niveles, los cuales fueron probados para obtener la mayor cantidad de biocombustible.

En la Tabla 6 se indica la influencia de los niveles de calentamiento en la obtención de biocombustible y el tiempo que tarda en iniciar la destilación del bio-aceite (producto pirolítico líquido).

Tabla 6. Resultados de la influencia de los niveles de calentamiento en la destilación del producto pirolítico

Nivel de calentamiento	t inicial (min)	T máx (°C)	Salida de biocombustible
Bajo	35	193	Sale producto, destilación muy lenta
Medio	20	274	Se obtiene alta cantidad de destilado
Alto	13	294	Al elevarse rápidamente la temperatura empieza a salir destilado pero se contamina con el bio-aceite

Luego de los ensayos preliminares realizados para la destilación se decidió usar el nivel medio de calentamiento puesto que se obtuvo una cantidad elevada de destilado (biocombustible).

La destilación del producto empezó en 20 min y se alcanzó una temperatura máxima de 274 °C.

3.4 Resultados de los ensayos de la pirólisis de aceite vegetal de desecho

En la Tabla 7 se indican las condiciones de operación que fueron seleccionadas para el proceso de pirólisis de AVD.

Tabla 7. Resumen de resultados sobre las condiciones de operación de la pirólisis de aceite vegetal de desecho

Condiciones de operación del proceso de pirólisis	
Temperatura alcanzada y Temperatura set respectivamente	400 °C / 420 °C
Tiempo	1,5 h
Agitación	No
Catalizador (carbonato de sodio)	No

La cantidad de gas que se generó en el proceso de pirólisis se indica en la Ecuación 2 y el rendimiento del proceso de pirólisis referente al bio-aceite se determinó mediante la Ecuación 3.

Para el balance de masa del gas se tuvo:

Entrada: 370,22 g aceite vegetal de desecho.

Salida: 231,88 g de producto líquido de la pirólisis (bio-aceite).

Salida: 99,51 g de aceite que se quedó en el interior del reactor.

Salida: Peso del gas que sale del proceso, en g.

$$370,22 \text{ g} - 231,88 \text{ g} - 99,51 \text{ g} = \text{Gas}$$

$$38,830 \text{ g} = \text{Gas que se genera}$$

Para el rendimiento del proceso de pirólisis con respecto al producto líquido se tuvo:

$$\%R = \frac{231,88 \text{ g producto líquido}}{370,22 \text{ g aceite vegetal desecho}} \times 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = 62,63 \%$$

En la Fig. 4 se presentan los ensayos de pirólisis de AVD que se realizaron durante 90 min; se observó que la temperatura del sistema de calentamiento en el reactor (T de operación del proceso) incrementó hasta que el proceso se estabilizó en valores cercanos a 400 °C, es decir que no se logró alcanzar la temperatura set máxima del reactor de 420 °C; esto se reflejó en la producción del líquido y gas cuando se realizó el balance de masa.

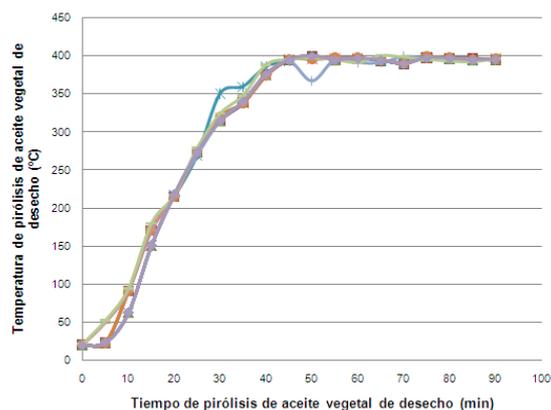


Figura 4. Ensayos de pirólisis de aceite vegetal de desecho

Las cantidades de productos y residuo generados en cada ensayo de pirólisis de aceite vegetal de desecho al usar 400 mL de aceite vegetal de desecho, 370,22 g, durante 90 min que duró el proceso fueron: 231,88 g de producto líquido, 38,83 g de producto gaseoso y 99,51 g de residuo.

3.5 Resultados de los ensayos de la destilación del producto proveniente de la pirólisis de AVD

Con los ensayos preliminares se estableció que la destilación del producto proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho requiere el uso de un nivel medio de calentamiento para la obtención de 120 mL de destilado (biocombustible) en 90 min con una temperatura máxima de 274 °C.

El proceso establecido para la destilación se realizó con cada producto pirolítico (bio-aceite) proveniente de los ensayos de pirólisis de AVD para obtener la cantidad de producto líquido necesario para analizarlo y comprobar si sus características son similares a las del diesel.

En la Fig. 5 se presentan los ensayos de destilación del bio-aceite proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho. Se observa, en general, en cada uno de los ensayos que a los 20 min empezó el proceso de destilación con la caída de la primera gota de destilado cuando la temperatura fue de 35 °C, luego se continuó con la tendencia a incrementar la temperatura hasta alcanzar una temperatura máxima que varió desde 250 °C hasta 274 °C de 80 a 95 min de iniciado el proceso hasta que ya no se produjo más salida de producto. Además en cada ensayo se observó que poca cantidad de residuo se quedaba en el interior del balón de destilación.

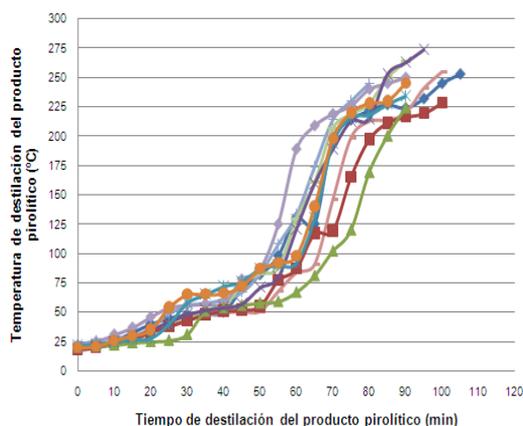


Figura 5. Ensayos de destilación del producto pirolítico para la obtención de biocombustible

El proceso para la obtención de biocombustible a partir de aceite vegetal de desecho se indica en la Fig. 6.

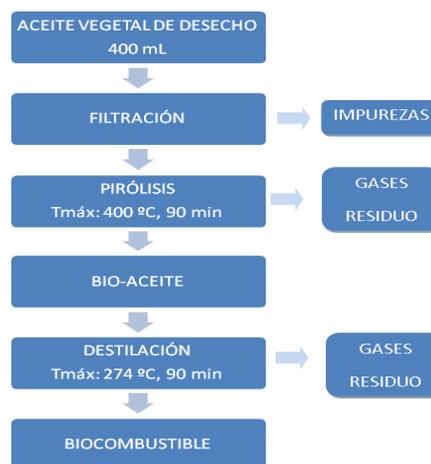


Figura 6. Diagrama de flujo del tratamiento realizado para la obtención de biocombustible a partir de aceite vegetal de desecho

3.6 Resultados de los análisis del biocombustible obtenido de la destilación del producto líquido proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho

El biocombustible obtenido de la destilación del producto pirolítico de aceite vegetal de desecho fue analizado para determinar su similitud con los combustibles derivados del petróleo.

Se debe indicar que no se puede hacer una comparación absoluta del biocombustible obtenido con el diesel convencional ya que aún no se produce a escala industrial biocombustible a partir de AVD ni se ha probado su funcionamiento en motores; lo que se puede establecer es una similitud de los requisitos que debe cumplir para su uso.

En la Tabla 8 se indican los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos que se realizaron al biocombustible obtenido a partir de AVD para ser comparado con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN1 489:99, cuarta revisión para productos derivados del petróleo, Diesel No. 2, en la que constan los requisitos que debe cumplir el combustible. Se determinó que la mayor parte de las propiedades obtenidas están en el rango permitido pero al tener un bajo índice de cetano va a causar un retardo en la ignición por lo que se debería realizar diferentes mezclas con el biocombustible obtenido para mejorar sus propiedades y comprobar su funcionamiento.

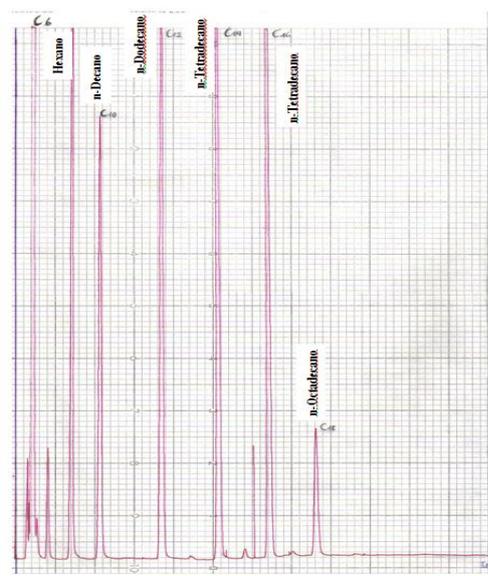


Figura 7. Cromatograma de estándares, C₁₀-C₁₂-C₁₄-C₁₆-C₁₈ utilizados para reconocer los hidrocarburos presentes en el biocombustible obtenido

En el producto sólido obtenido, el residuo de la destilación del producto pirolítico, se determinó que el contenido de carbón a 400 °C fue de 0,01 g y no se obtuvieron cenizas a 600 °C. El carbón al ser más pesado que las cenizas salió al ambiente en forma de dióxido de carbono.

En la Fig. 7 se presenta el cromatograma de los estándares inyectados: hexano, n-decano, n-dodecano, n-tetradecano, n-hexadecano y n-octadecano, con el que se compararon los cromatogramas de las muestras de biocombustible para

identificar la presencia de hidrocarburos mediante la aparición de los picos en el mismo tiempo de retención que cada uno de los estándares presentó.

En la Fig. 8 se indica el cromatograma en el que se identificaron los hidrocarburos presentes en el biocombustible que se obtuvo de la destilación del producto proveniente de la pirólisis de AVD (bio-aceite). Al comparar este cromatograma con el que se obtuvo de los estándares se observó que los hidrocarburos identificados fueron hexano, n-dodecano, n-tetradecano y n-hexadecano, y los componentes que aparecieron entre los hidrocarburos n-parafínicos pertenecían a hidrocarburos isoparafínicos.

Este análisis se realizó con 4 muestras de biocombustible provenientes de diferentes procesos de destilación de producto pirolítico para verificar si el cromatograma era reproducible, una vez que se comprobó que se obtenía el mismo resultado de las cromatografías realizadas, se confirmó que los componentes presentes en el biocombustible obtenido siempre eran los que se mencionaron anteriormente puesto que aparecían en el mismo tiempo de retención que los estándares indicados.

Tabla 8. Resultados de los análisis realizados al biocombustible comparados con los requisitos del diesel N°. 2

Ensayo	Biocombustible	Diesel No. 2
Punto de inflamación (°C)	51,6	Mínimo 51
Contenido de agua (% v/v)	0,004	Máximo 0,05
Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación (Conradson % peso)	1,15	Máximo 0,15
Cenizas (% peso)	0,0078	Máximo 0,01
Densidad a 15 °C (g/cm ³)	0,8665	-----
Viscosidad cinemática a 37,8 °C (cSt)	2,72	Mínimo: 2,5 Máximo: 6
Azufre (% peso)	0,0032	Máximo 0,7
Corrosión a la lámina de cobre	1a	Máximo No. 3
Punto de nube (°C)	-4	-----
Número de ácido (mg KOH/g biocombustible)	257,66	-----
Poder calórico (J/g biocombustible)	37 210,46	41 860
Contenido de fósforo (mg fósforo/kg biocombustible)	119,04	-----
Combinación de calcio y magnesio (mg/L biocombustible)	Ca: 1,62 Mg: 0,47	-----
Combinación de sodio y potasio (mg/L biocombustible)	Na: 0,75 K: 0,19	-----
Estabilidad a la oxidación 110 °C, 6 h	Formación de gomas: 0,2 g	-----
Índice de yodo (cg yodo/g biocombustible)	48,97	-----
Temperatura de destilación del 90% (°C)	286,20	Máximo 360
Índice de cetano calculado	31,56	Mínimo 45
Número de cetano	28,14	-----

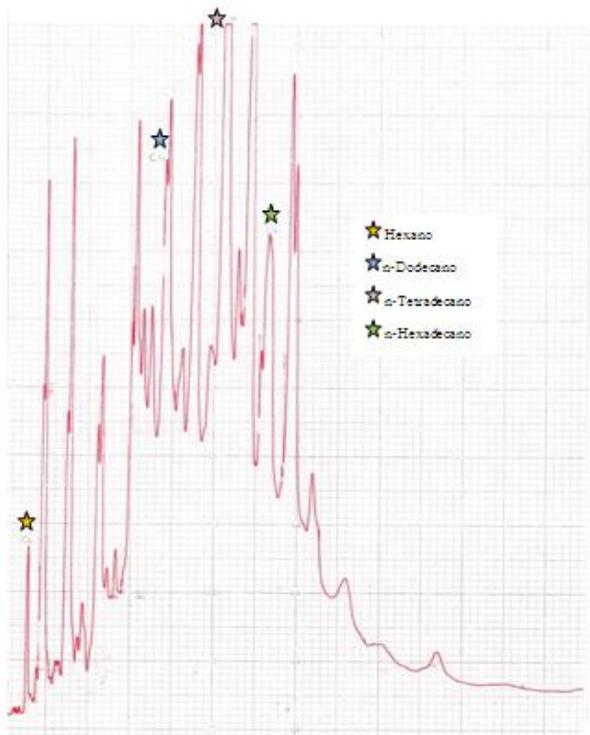


Figura 6. Cromatograma del biocombustible obtenido e identificación de los hidrocarburos lineales presentes

En la Fig. 9 para el gas producido en la pirólisis de aceite vegetal de desecho obtuvo el cromatograma en el cual los compuestos identificados fueron nitrógeno, metano, dióxido de carbono, etano, propano, n-butano, n-pentano, hidrocarburos isoparafínicos y otros componentes en menor proporción.

Este análisis se realizó con 4 muestras de gas que fueron recolectadas de diferentes procesos de pirólisis de aceite vegetal de desecho para verificar si el cromatograma era reproducible con las muestras, una vez que esto fue comprobado con los resultados obtenidos, se determinó que en este caso se obtuvieron los mismos componentes pero su composición era variable, además los componentes aparecen siempre en el mismo orden, esto se observa en la Fig. 10, pero en distinta proporción como se verifica en la Fig. 11 y Fig. 12.

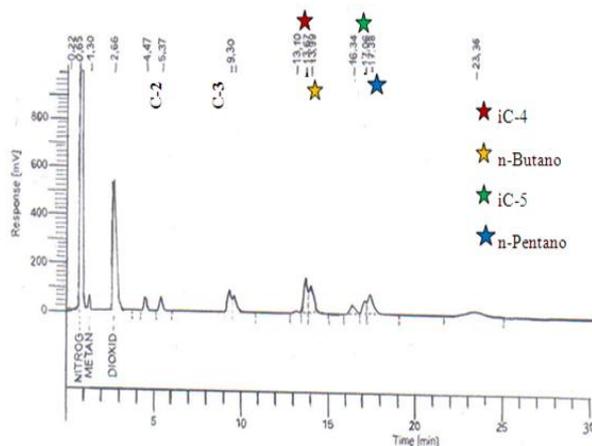


Figura 7. Cromatograma A de los gases producidos en la pirólisis de aceite vegetal de desecho e identificación de los hidrocarburos lineales presentes

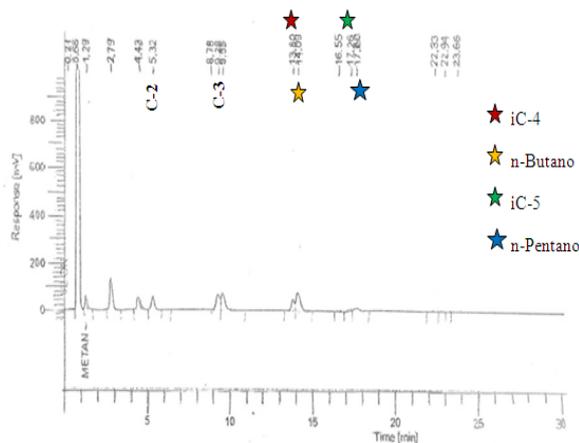


Figura 8. Cromatograma B de los gases producidos en la pirólisis de aceite vegetal de desecho e identificación de los hidrocarburos lineales presentes

GASES DE POZO					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [$\mu\text{V} \cdot \text{sec}$]	Height [μV]	Area [%]
1		0,222	52793,36	2264,27	0,16
2		0,647	7060,86	4292,06	0,02
3		0,682	8020,09	4699,66	0,02
4	nitrógeno	0,721	12305926,8	988859,59	36,99
5	metano	1,299	318775,82	59199,83	0,96
6	dióxido de carbono	2,657	755349,18	539064,09	22,7
7		4,471	613479,62	54400,46	1,84
8	etano	5,365	685169,19	57999,79	2,06
9	propano	9,303	1321490,58	88914,21	3,97
10		9,569	1141701,12	69161,95	3,43
11		13,102	121186,68	7517,22	0,36
12	isobutano	13,672	1993349,54	145082,54	5,99
13	butano	13,991	2283464,94	114753,29	6,86
14		16,339	816096,71	38232,12	2,45
15	isopentano	17,057	784105,28	54764,14	2,36
16	pentano	17,378	2101942,99	81045,57	6,32
17		23,361	1160332,72	16926,37	3,49

Figura 9. Resultados del cromatograma A de los gases producidos en la pirólisis de aceite vegetal de desecho

GASES DE POZO					
Peak #	Component Name	Time [min]	Area [uV*sec]	Height [uV]	Area [%]
1		0,215	47940,5	2028,3	0,22
2		0,655	9874,31	3472,83	0,04
3	nitrogeno	0,695	14166038	98863,33	63,68
4	metano	1,286	378957,56	60054,6	1,7
5	dióxido de carbono	2,789	1405086,08	133635,94	6,32
6		4,432	592115,24	53470,12	2,66
7	etano	5,321	687842,17	58538,45	3,09
8		8,781	339675,21	4703,86	1,53
9	propano	9,282	1142120,75	66407,79	5,13
10		9,552	1196937,73	72923,92	5,38
11	isobutano	13,796	624280,76	50688,12	2,81
12	butano	14,088	1217647,38	75051	5,47
13		16,551	9249,32	545,73	0,04
14	pentano	17,259	93864,44	6499,32	0,42
15		17,6	915927,83	14690,21	1,42
16		22,332	14924,8	566,26	0,07
17		22,94	2601,18	80,56	0,01
18		23,66	1454,18	58,13	0,01

Figura 10. Resultados del cromatograma B de los gases producidos en la pirólisis de aceite vegetal de desecho

Adicionalmente se pudo realizar finalmente una comparación de los colores del AVD, el bio-aceite y el biocombustible con lo indicado por Meecr, 2009, p.1; se notó que al inicio el AVD era de color marrón, luego de la pirólisis se obtuvo el producto pirolítico de color amarillo brillante hasta llegar al biocombustible que era de color amarillo pálido. Esto muestra que el aceite vegetal de desecho se encontraba en el número comparador de color en el rango desde 5,5 a 7,0 (condición crítica); el bio-aceite con un color más claro se encontraba en el rango desde 2,5 a 4,0 (condiciones marginales) y el biocombustible que se obtuvo se encontraba en el rango desde 0,5 a 1,0 (buen aceite). El biocombustible obtenido se pudo comparar con el biodiesel que proviene del aceite de piñón y cumple con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 482: 2009, que es

utilizado para reemplazar los combustibles fósiles en la Isla Floreana en Galápagos, para determinar si el proceso por el que fueron generados influye en la calidad del combustible que se requiere.

Para la elaboración de biodiesel en Galápagos producido con base en la norma indicada, se utiliza el proceso de transesterificación del aceite de piñón mientras que para obtener el biocombustible se destiló el producto líquido proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho.

En la Tabla 9 se indican los requisitos de los distintos parámetros que debe cumplir el biodiesel para ser usado como combustible en Galápagos y los resultados que se obtuvieron al realizar los análisis del biocombustible obtenido mediante el proceso de pirólisis de AVD.

Al comparar los requisitos, se observó que varias propiedades tienen valores que se encuentran dentro del rango establecido por la norma pero otros parámetros están sobre el máximo valor permitido, por lo que se estableció que se pueden obtener combustibles utilizando aceites vegetales como materia prima pero su calidad depende del proceso que se aplique para su obtención y de la materia prima.

El biodiesel y el biocombustible con respecto a los combustibles derivados de petróleo son menos contaminantes, sus procesos de producción son más sencillos pero se deben establecer las condiciones de operación de cada equipo que se necesite y la adecuada materia prima para obtener el producto requerido (Cerveró, Coca y Luque, 2008, p. 79; Singh, Handash y Murugan, 2010, p. 1; Goyal, Seal y Saxena, 2006, pp. 508, 514-515; Maher y Bressler, 2006, p. 2 365).

Tabla 9. Requisitos del biodiesel

Requisitos biodiesel	Mínimo	Máximo	Biocombustible obtenido
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	860	900	866,5
Punto de inflamación (°C)	120	-	51,6
Punto de turbidez (°C)	Reportar ¹		-
Φ Agua y sedimento (%)	-	0,05	-
Contenido de agua (mg/kg)	-	500	0,2 mL/50 mL biocombustible
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /S)	3,5	5	2,72 cSt a 37,8 °C
Cenizas sulfatadas% (m/m)	-	0,02	-
Contenido de azufre (mg/kg)	-	10	0,0032 %
W Carbón Residual ² (%)	-	0,05	1,1512
Corrosión a la lámina de cobre	-	3	1a
Número de cetano	49	-	28,14
Temperatura de destilación al 90% recuperado (°C)	-	360	286,20
W Glicerina libre(%)	-	0,02	-
W Glicerina total (%)	-	0,25	-
WC _{contenido de ésteres} (%)	96,5	-	-
Índice de yodo (g yodo/100 g)	-	120	48,9752
WC _{contenido de metanol} (%)	-	0,20	-
Contenido de fósforo (mg/kg)	-	10	119,0480
Contenido de metales alcalinos (Na + K) (mg/kg)	-	5	Na: 0,75 K: 0,19 mg/L
Contenido de metales alcalinos (Ca + Mg) (mg/kg)	-	5	Ca: 1,62 Mg: 0,47 mg/L
Número de acidez (mg KOH/g)	-	0,5	257,6630

4 CONCLUSIONES

Los análisis realizados para determinar la calidad del aceite vegetal de desecho indican que esta materia prima es un aceite no secante con un elevado desdoblamiento en ácidos y glicerina. Todas las propiedades analizadas en el aceite están relacionadas y son indicativas de que el aceite vegetal de desecho, utilizado para la producción de biocombustible, por efecto de la luz, del oxígeno del aire, de la acción enzimática, modo de conservación, etc., es apto para ser usado como materia prima en la producción de biocombustibles.

Con las pruebas preliminares de pirólisis de aceite vegetal de desecho, se determinó que hasta 350 °C no se obtuvo producto. A partir de 400 °C empezó a salir producto visible en el refrigerante.

El uso de carbonato de sodio como catalizador durante la agitación no favoreció la salida del producto, al contrario de esto se formó una masa compacta dentro del reactor.

Debido a las condiciones de diseño del equipo que se utilizó, la máxima temperatura que se pudo alcanzar en el reactor durante el proceso de pirólisis de aceite vegetal de desecho fue de 400 °C y, el rendimiento que se obtuvo con respecto al producto líquido fue 62,63 %.

El tiempo de duración del proceso de pirólisis de aceite vegetal de desecho de 90 min fue escogido durante los ensayos preliminares, puesto que, en tiempos menores se quedaba un alto contenido de aceite en el interior del reactor y, en tiempos mayores el aceite se carbonizaba.

Durante la pirólisis de aceite vegetal de desecho y a temperatura de 350 °C a los 35 min de iniciado el proceso, se observó la presencia de humo en el refrigerante; a los 41 min y a 385 °C se comprobó la presencia de hidrocarburos gaseosos en el producto; y a los 45 min y a 395 °C el producto pirolítico empezó a salir y comenzó su recolección para su posterior destilación y análisis.

El porcentaje de residuo dentro del reactor durante la pirólisis de aceite vegetal de desecho a 400 °C durante 90 min, fue del 26,87 %, y el porcentaje de gases por diferencia con los productos de salida del reactor fue del 10,50 %.

La destilación del producto pirolítico recolectado se realizó con el nivel medio de calentamiento, la primera gota de destilado se produjo a 35 °C, el proceso duró 90 min y alcanzó una temperatura máxima de 274 °C. Además, se obtuvo un promedio de destilado de 120 mL de biocombustible por ensayo.

Los análisis realizados al biocombustible producido indican que al comparar los resultados obtenidos con los

indicados en la Norma INEN 1 489: 99 para diesel No.2, se obtuvo un combustible con características similares al requerido en motores de combustión interna de auto ignición.

Con el análisis de cromatografía de gases realizado al biocombustible se identificaron cualitativamente la presencia de hidrocarburos como hexano, n-dodecano, n-tetradecano, n-hexadecano y se observó la presencia de isómeros. El cromatograma de la muestra fue reproducible, es decir que se obtuvo la misma calidad de producto luego de realizar cada prueba.

Con el análisis de cromatografía de gases que se realizó en el gas proveniente de la pirólisis de aceite vegetal de desecho se identificaron nitrógeno, metano, dióxido de carbono, etano, propano, isobutano, butano, isopentano, pentano, encontrándose en mayor cantidad butano y pentano. Además, se observó que en los cromatogramas realizados los compuestos aparecían en la misma posición, pero su composición era variable.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Alemana de Energía. (2010). *Energías Renovables – Made in Germany: La diversidad de bioenergía*. Berlín, Alemania: Dena.
- [2] Bailey, A. (1961). *Aceites y grasas industriales: Reacciones e hidrogenación*. (2da. ed.). Zaragoza, España: Reverté.
- [3] Banco Central del Ecuador. (2013). Estadísticas. *Cifras del sector petrolero ecuatoriano*. <http://www.bce.fin.ec/frame.php?CNT=ARB0000984>. (Marzo, 2013)
- [4] Billaud, F., Gornay, J. y Coniglio, L. (2007). Pyrolysis of secondary raw material from used frying oils. *Récents Progrès in Génie des Procédés*, 1(94), 1-8. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/98/28/PDF/frying-oils.pdf>. (Febrero, 2011).
- [5] Blas, L. (1954). *Agenda del Químico: Constantes físicas y químicas de aceites vegetales*. (2da. ed.). Madrid, España: Aguilar.
- [6] Cámara de Industrias y Comercio Ecuatoriano - Alemana. (2011). *Eficiencia energética y energías renovables – Made in Germany: Sustentabilidad ambiental*. Quito, Ecuador: Verlag.
- [7] Cerveró, J., Coca, J. y Luque, S. (2008). Production of biodiesel from vegetable oils. *Grasas y aceites*, 59(1), 76-83. https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:UlgQiSvoq0kJ:grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/download/494/496+production+of+biodiesel+from+vegetable+oil,+jos%20C3%A9+mar%C3%ADa+cerver%C3%B3&hl=es&gl=ec&pid=bl&srcid=ADGEESja_gUvPcrDsPNILzaHqEgI1sXnK1VxiiCByAv7tZK616y83xYX8PpnMmStGLKtMfEdnYnIbCulQjdiiRPIgqRfyet47z6yhrdfelt6bIx6WhDbAVebGUJklmSK95vMDx9IZB&sig=AHIEtbQfhIzOjRFFTI9NUpv703IZI2s98Q. (Febrero, 2011).
- [8] Cheftel, J. y Cheftel H. (1976). *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos: Grasas y aceites*. Zaragoza, España: Acribia.
- [9] Ciria, I. (2012). Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel. *Wearcheck Ibérica*, 1(1), 1-20. <http://www.crowniron.com/userImages/Spanish%20Biodiesel%20Insert.pdf>. (Noviembre, 2012).
- [10] Cox, H. y Pearson, D. (1962). *The chemical analysis of foods: Oil and fats*. New York, Estados Unidos de América: Chemical Publishing CO.
- [11] Crown Iron Works Company. (2006). Proceso pretratamiento biodiesel. *Crown Iron*, 1(1), 1 - 2. <http://www.crowniron.com/userImages/Spanish%20Biodiesel%20Insert.pdf>. (Noviembre, 2012)
- [12] Demirbas, A. (2006). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in energy and combustion science*, 1(33), 1-18. <http://scienzechimiche.unipr.it/didattica/att/17b5.3866.file.pdf>. (Diciembre, 2010).
- [13] Dupont, J., Suarez, P., Meneghetti, M. y Meneghetti, S. (2009). Catalytic production of biodiesel and diesel like hydrocarbons from triglycerides. *Energy and Environmental Science*, 1(2), 1-13. <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2009/EE/b910806h.pdf>. (Noviembre, 2010).
- [14] EFE. (2011, lunes 21 de febrero). Quito tendrá una planta de procesamiento de aceites sin uso de químicos. *El Universo*. <http://www.eluniverso.com/2011/02/21/1/1356/quito-tendra-planta-procesamiento-aceites-sin-uso-quimicos.html>.
- [15] EFE. (2011, martes 22 de febrero). Planta para un biodiesel ecológico. *Expreso*. <http://expreso.ec/expreso/default.asp?idcat=19308&tipo=8>.
- [16] EFE. (2011, martes 22 de febrero). En Quito se construye una planta de biodiesel. *La Hora*. <http://www.lahora.com.ec/frontEnd/includeTemplates/edicionImpresa.php?idRegional=29&d>

- ateEdition =2011-02-22&fecha=Martes,%2022%20de%20Febrero%20de%2020211.
- 996.http://www.biodiesel.gov.br/docs/JAAP.pdf. (Noviembre, 2010).
- [18] FEDAPAL. (2012). Estadísticas. <http://www.fedapal.com/#>. (Junio, 2011).
- [19] Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2008). Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite. *Kassel*, 1(1), 1-123. http://books.google.com.ec/books?id=2Pa8EGyKFE8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true. (Junio, 2011).
- [20] Goyal, H., Seal, D. y Saxena, R. (2006). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1(12), 504-517. <http://envsus610.110mb.com/pyrolysis1.pdf>. (Enero, 2011).
- [21] Holguín, A. (1981). *Laboratorio de Petróleos: Guía de laboratorio parte II*. Quito, Ecuador: Departamento de Ingeniería y Tecnología, Escuela Politécnica Nacional.
- [22] Intelifuel. (2012). Aceite vegetal de desecho. <http://www.intelifuel.com/>. (Junio, 2012).
- [23] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Normas Técnicas Ecuatorianas: NTE INEN 1 489:99 cuarta revisión. Productos derivados del petróleo: Diesel - Requisitos; NTE INEN 2 482:2009 Biodiesel – Requisitos*. Quito, Ecuador.
- [24] Kirk, R. y Othmer, D. (1962). *Enciclopedia de Tecnología Química: Grasas y aceites grasos*. Distrito Federal México, México: Español.
- [25] Legaz, R. (2010). *Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible: el aceite vegetal*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Máster en ingeniería de la energía). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. <http://upcommon.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/9403/6/3.4.%20EI%20aceite%20vegetal.pdf>. (Noviembre, 2012).
- [26] Lima, D., Soares, V., Ribeiro, E., Carvalho, D., Cardoso, E., Rassi, F., Mundim, K., Rubim, J. y Suarez, P. (2004). Diesel – like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. *Journal of analytical and applied JAAP.pdf*. by pyrolysis of vegetable oils. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 1(71), 987-996. <http://www.biodiesel.gov.br/docs/JAAP.pdf>. (Noviembre, 2010).
- [27] Maher K.D. y Bressler D.C. (2006). Pyrolysis of triglyceride material for the production of renewable fuels and chemicals. *Bioresource technology*, 1(98), 2351-2368. <http://d.yimg.com/kp/groups/3004572/1707516408/name/Pyrolysis+of+triglyceride+materials+for+the+production+of+renewable+fuels+and+chemicals.pdf>. (Enero, 2011).
- [28] Maples, R. (1993). *Petroleum Refinery Process Economics: Gasoline and distillate blending*. Oklahoma, Estados Unidos de América: Pennwell books.
- [29] Meecr. (2009). Reguladores de combustible: cuantificación del color del aceite según ASTM D 1524-84. *Mantenimiento de equipos*, 1(1), 1-25. <http://meecr.blogspot.com/>. (Marzo 2013).
- [30] Miliarium.com. (2011). Ingeniería Civil y Medio Ambiente: Aplicaciones del biodiesel: *Biocombustibles*, 1(1), 1-5. <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/> (Diciembre, 2010).
- [31] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2008). *Estudio de factibilidad para el uso de biocombustibles, proyecto ERGAL*. Energía renovable para Galápagos: sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles en la generación de energía eléctrica en la isla Floreana, Quito, Ecuador. <http://www.mer.gob.ec>. (Diciembre, 2010)
- [32] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2011). *Experiencias del proyecto piñón para Galápagos*. Energías Renovables, Quito, Ecuador. <http://www.mer.gob.ec>. (Febrero, 2011).
- [33] OilWorld. (2012). <http://www.oilworld.biz/app.php?fid=1000&fpar=0&iisSSL=0&aps=0&blub=00bf172bb40cde9e19d029f9be854620>. (Septiembre, 2012).
- [34] Ruiz, M., Marmesat, S., Liotta, A. y Dobarganes, M. (2008). Analysis of used frying fats for the production of biodiesel. *Grasas y aceites*, 59(1), 45-50. <http://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/489/491>. (Febrero, 2011).
- [35] Singh, B., Hansdah, D. y Murugan, S. (2010). *Performance and exhaust emissions of a diesel engine using pyrolysis oil from waste frying oil*

- and castor oil mixture*. International conference on sustainable mobility 2010, Kuala Lumpur, Malaysia. <http://dspace.nitrkl.ac.in/dspace/bitstream/2080/1343/1/MuruganICSM+paper.pdf>. (Febrero, 2011).
- [36] Srivastava, A. y Prasad, R. (1999). Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1(4), 111-133. <http://kotisivu.dnainternet.net/vire6/pdf-tiedostot/Triglyserides%20based%20diesel%20fuels.pdf>. (Febrero, 2011).
- [37] S/A (2007). Termodinámica y termotecnia. <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>. (Septiembre 2012).
- [38] Tirado, J. (2010). *Estudio comparativo entre la forma de obtención de biodiesel a partir de aceite de palma y residuos de aceite de cocina*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial no publicado). Universidad Autónoma de Medellín, Medellín, Colombia. <http://www.uam.edu.co/CMS/Noticias/popups/images/Anteproyecto%2010.pdf> (Enero, 2011).
- [39] Velásquez, W. (2009). Biomasa. *Renewable energy*, 1(1), 1-23. <http://www.emagister.com/curso-biomasa-energias-renovables>. (Febrero, 2011).
- [40] Villavecchia, V. (1963). Substancias grasas. Gili (Ed.) *Tratado de Química Analítica Aplicada*, (pp. 487 - 595). Barcelona, España: Gustavo Gili.
- [41] Wärtsilä. (2006). Liquid Biofuel Power Plants. *Wärtsilä: Power Plants*, 1 (1), 1-11.
- [42] XVII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química. (2011). Biocombustibles: Caracterización de un aceite o grasa pura y de desecho. *XVII COLAEIQ – UNAM* (pp. 1 – 15). México Distrito Federal, México: UNAM.