



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Tesis previa a la obtención del Título de: INGENIERA AMBIENTAL**

**“ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA PRELIMINAR PARA LA  
OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES MEDIANTE LA PIRÓLISIS DE  
RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA SALESIANA”**

**AUTORAS:**

**ESPINOZA MERCHÁN JOHANNA ELIZABETH**

**NARANJO CABRERA TANIA MARISOL**

**DIRECTOR:**

**PABLO AREVALO MOSCOSO Ph.D.**

**CUENCA, 2014**

## **RESUMEN**

Los residuos plásticos generan una problemática a nivel mundial debido a su persistencia en el ambiente, provocando la desintegración de sus partículas y la consecuente bioacumulación, además de la disminución del tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios.

Se han planteado varias técnicas para la valorización de residuos plásticos, entre las que se encuentran el reciclado mecánico, aprovechamiento energético y reciclado químico que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis.

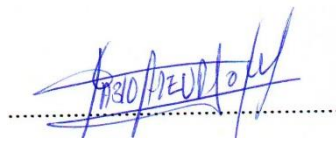
En este estudio se desarrolla el proceso de pirólisis, de Polietilentereftalato, Polietileno de Alta Densidad y Poliestireno que son los residuos plásticos de mayor generación dentro de la Universidad Politécnica Salesiana, a una temperatura de 400°C y un tiempo de residencia de 30 minutos; del cual se determina 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.

Previo a los ensayos anteriores, se determina que a temperaturas menores a 300°C el proceso no se desarrolla en su totalidad, obteniéndose aceites sin pirolizar en la cápsula de porcelana, además se comprobó que el uso de catalizador disminuye la producción de fracción líquida; y finalmente la cantidad de producto líquido obtenida en los tiempos de residencia de 30, 60 y 120 minutos, no muestra diferencia significativa, por lo que se opta por trabajar a 30 minutos.

A partir de los análisis físicos y de cromatografía, esta investigación demuestra que las fracciones líquidas del proceso de pirólisis de residuos plásticos, poseen características y sustancias que forman parte de los combustibles y petróleos.

# CERTIFICACIÓN

Certifico, que el presente trabajo intitulado “*Estudio de Viabilidad Técnica Preliminar para la Obtención de Combustibles Mediante la Pirólisis de Residuos Plásticos Generados en la Universidad Politécnica Salesiana*” fue realizado por Espinoza Merchán Johanna Elizabeth y Naranjo Cabrera Tania Marisol, bajo mi supervisión.



Pablo Arevalo Moscoso Ph.D.

**DIRECTOR DE TESIS**

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de Espinoza Merchán Johanna Elizabeth y Naranjo Cabrera Tania Marisol. Autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma para fines académicos.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Cuenca, Julio 16 de 2014.



Johanna Espinoza



Tania Naranjo

# DEDICATORIAS

## *Espinoza Merchán Johanna Elizabeth*

A mis papis Doli y Mani, y a mi hermanita Kari que han sido mi más grande apoyo y ejemplo a lo largo de mi vida.

A las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, a todas ellas muchas gracias.

## *Naranjo Cabrera Tania Marisol*

Este trabajo lo dedico indudablemente a DIOS por el regalo de la vida y a mis viejitos MARTHA y ENRIQUE, que son mi fuente de inspiración, por ser ejemplo de lucha diaria incansable y por enseñarme que todo se puede lograr con esfuerzo y dedicación.

A mi hijo DIEGO ANDRÉS y a mi esposo DIEGO ARMANDO, que son mi presente y mi futuro, que cambiaron el rumbo de mi vida y le dieron un sentido sublime y lleno de fortaleza.

A mis hermanas, LORE por apoyarme en las circunstancias difíciles y JOMY por ser mi compañera durante mi carrera estudiantil, sin ti no lo hubiera podido lograr.

# AGRADECIMIENTOS

El más sincero agradecimiento a nuestro maestro y amigo PABLO AREVALO MOSCOSO, Ph.D, por su dirección, valiosos consejos y apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. SERVIO ASTUDILLO y a la Dra. MIRIAM MANCHENO por su colaboración.

A nuestros compañeros de la U, con quienes hemos compartido gratos momentos durante la carrera universitaria.

Y a todas las personas que de una u otra manera nos han acompañado y brindado su apoyo.

A todos ustedes, GRACIAS...

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	III
DEDICATORIAS .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
INTRODUCCIÓN .....	XII
OBJETIVOS .....	XIV
CAPÍTULO 1 .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.2. DEFINICIÓN.....	4
1.3. CLASIFICACIÓN .....	4
1.4. RESIDUOS PLÁSTICOS.....	6
1.5. TÉCNICAS PARA EL APROVECHAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS .....	9
1.6. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS .....	13
CAPÍTULO 2.....	18
2.1. ANTECEDENTES.....	19
2.2. DEFINICIÓN .....	20
2.3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN.....	21
2.4. PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS .....	23
2.5. REACTOR DE PIRÓLISIS .....	26
2.6. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS .....	27
CAPÍTULO 3 .....	29
3.1. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	29
3.2. PRE-TRATAMIENTO DE RESIDUO PLÁSTICO .....	31
3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....	32

3.4.	PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA DAR INICIO AL PROCESO DE PIRÓLISIS.....	35
3.5.	PROCESO GENERAL DE PIRÓLISIS.....	38
3.6.	VALORACIÓN DE LA PIRÓLISIS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS.....	43
3.7.	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA DE PIRÓLISIS.....	43
3.8.	DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES QUE CONTIENEN LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS.....	58
CAPÍTULO 4.....		62
4.1.	CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	62
4.2.	PROCESO DE PIRÓLISIS A TEMPERATURAS MENORES DE 300°C.. .....	63
4.3.	PROCESO DE PIRÓLISIS CON CATALIZADOR.....	64
4.4.	PRUEBAS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RESIDENCIA MÁS ÓPTIMO.....	66
4.5.	VALORACIÓN DE LA PIRÓLISIS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS.....	68
4.6.	ANÁLISIS FÍSICOS.....	71
4.7.	CROMATOGRAFIA DE GASES.....	75
CAPÍTULO 5.....		78
5.1.	CONCLUSIONES.....	78
5.2.	RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....		81
ANEXOS.....		86
ANEXO 1: DATOS OBTENIDOS DE LA CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....		86
ANEXO 2: PRUEBAS PARA COMPROBAR EL RENDIMIENTO DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON Y SIN EL USO DE CATALIZADOR ZEOLITA.....		88
ANEXO 3: ANÁLISIS DE ANOVA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA CON Y SIN EL USO DE CATALIZADOR.....		89
ANEXO 4: ENSAYOS REALIZADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE RESIDENCIA.....		90
ANEXO 5: ANÁLISIS ANOVA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA A DIFERENTES TIEMPOS DE RESIDENCIA (30, 60 Y 120 MINUTOS).....		91
ANEXO 6: ENSAYOS REALIZADOS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS.....		92



ANEXO 7: ANÁLISIS ANOVA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA CON RESIDUOS PLÁSTICOS DE PEAD, PS Y PET.....	94
ANEXO 8: REPORTES DE LA CROMATOGRAFÍA DE PS OBTENIDO A 140°C Y A 165°C, Y DE PEAD OBTENIDO A 140°C Y 170°C.....	96
ANEXO 9: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD.....	100
ANEXO 10: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO.....	101
ANEXO 11: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIETILENTEREFTALATO.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.- Clasificación de Termoplásticos Según la SPI.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2.- Métodos tecnológicos de recuperación de los desechos plásticos en la Unión Europea en 1994 .....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3.- Codificación internacional de la Sociedad de la Industria de Plásticos .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4.- Condiciones del proceso de pirólisis y productos .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5.- Factor de corrección (b) .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6.- Ensayos con temperaturas menores a 300°C.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 7.- Comparación de pruebas con y sin catalizador zeolita .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 8.- Tipo de hidrocarburo de acuerdo a la Gravedad API .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 9.- Punto de Inflación y Congelación de PEAD y PS.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 10.- Fracciones de Destilado de PEAD y PS.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11.- Sustancias contenidas en las fracciones de PS y PEAD .....</i>	<i>76</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1.- Generación por tipo de plástico en Europa .....</i>	<i>8</i>
<i>Gráfico 2.- Producción diaria de residuos plásticos dentro de la Universidad Politécnica Salesiana .....</i>	<i>62</i>
<i>Gráfico 3.- Gráfico de cajas de pruebas con y sin catalizador .....</i>	<i>65</i>
<i>Gráfico 4.- Análisis de Tukey de pruebas con y sin catalizador.....</i>	<i>66</i>
<i>Gráfico 5.- Fracción líquida en diferentes tiempos de residencia .....</i>	<i>67</i>
<i>Gráfico 6.- Gráfico de cajas de ensayos a 30, 60 y 120 minutos .....</i>	<i>68</i>
<i>Gráfico 7.- Rendimiento de los diferentes tipos de plástico con relación a la fracción líquida obtenida. ....</i>	<i>69</i>
<i>Gráfico 8.- Ensayos con diferentes tipos de residuos plásticos.....</i>	<i>70</i>
<i>Gráfico 9.- Análisis de Tukey de PET, PEAD y PS .....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfico 10.- Densidad y Gravedad API del PEAD y PS .....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfico 11.- Viscosidad de la fracción líquida de PEAD y PS.....</i>	<i>74</i>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.- Reacción de termo- descomposición del poliestireno .....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 2.- Clasificación de residuos plásticos en la Universidad Politécnica Salesiana .....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 3.- Plásticos clasificados en distintas fundas .....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 4.- Retiro de etiquetas.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 5.- Envases lavados y secos.....</i>	<i>31</i>

<i>Ilustración 6.- PEAD, PS y PET triturados .....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 7.- Reactor de pirólisis .....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 8.- Refrigerante.....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 9.- Matracas erlenmeyer refrigerados (250ml) y erlenmeyer para gases (1000ml) .....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 10.- Capsula de porcelana vacía y cápsula de porcelana con plástico .....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 11.- Erlenmeyer vacío.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 12.- Reactor de pirólisis completamente sellado.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 13.- Cilindro de gas nitrógeno .....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 14.- Matracas Erlenmeyer colectores de líquido.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 15.- Erlenmeyer para medir gases .....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 16.- Pantalla de ajuste e imagen de registro de temperatura .....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 17.- Erlenmeyer con fracción líquida obtenida.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 18.- Tubos con fracción líquida.....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 19.- Residuo sólido en cápsula de porcelana .....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 20.- Catalizador Zeolita .....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 21.- Analizador de humedad.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 22.- Mufla .....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 23.- Recipiente hermético contenedor de zeolita.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 24.- Producto líquido de PS y PEAD .....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 25.- Producto líquido y residuo carbonoso de PET .....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 26.- Baño a 30°C .....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 27.- Peso del picnómetro con agua .....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 28.- Proceso para determinar el peso del PEAD .....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 29.- Proceso para determinar el peso del PS.....</i>	<i>48</i>

<i>Ilustración 30.- Tiempo que tarda el PEAD y PS en fluir a través del viscosímetro.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 31.- Análisis del Punto de Inflamación del PEAD .....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 32.- Análisis del Punto de Inflamación del PS .....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 33.- Cromatógrafo de Gases .....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 34.- Sistema de destilación .....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 35.- Viales a ser analizados.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 36.- Residuo resinoso acumulado en cápsula de porcelana .....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 37.- Fracción Líquida de PEAD y PS .....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 38.- Fracciones de destilación de PEAD y PS .....</i>	<i>76</i>

# INTRODUCCIÓN

El consumo de productos plásticos se ha incrementado progresivamente, debido principalmente a sus características físicas y su bajo costo, razones por las cuales han llegado a ser dominantes en el mercado. Sin embargo esto ha dado lugar a una creciente generación de residuos poliméricos, que debido a su baja degradabilidad ocasionan la acumulación de dichos residuos en el ambiente, con la consecuente reducción de la vida útil de los rellenos sanitarios y la bioacumulación de las partículas al momento de su desintegración.

En busca de soluciones a esta problemática se han planteado diversas alternativas, entre las que se encuentran el reciclado mecánico, aprovechamiento energético y reciclado químico que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis. De las cuales, la pirólisis presenta mayores ventajas sobre el reciclado mecánico, ya que permite ingresar al proceso todo tipo de plástico sin necesidad de caracterización incluso admite aquellos residuos plásticos cuya separación es inviable, en esto coincide con el aprovechamiento energético del cual se obtiene energía para diversos procesos, sin embargo, de la pirólisis se obtiene una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables, que pueden ser reutilizados por la industria petroquímica o ser empleados como combustibles.

Se plantea la presente investigación con la finalidad de determinar si el proceso de pirólisis de residuos plásticos genera combustible, este proyecto titulado “Estudio de Viabilidad Técnica Preliminar para la Obtención de Combustibles Mediante la Pirólisis de Residuos Plásticos Generados en la Universidad Politécnica Salesiana”, comprende cinco capítulos detallados a continuación.

En el Capítulo 1, se presentan datos generales de producción de residuos plásticos y la problemática ambiental derivada de ello, mediante los antecedentes se da a conocer la historia del avance tecnológico en la producción de plásticos, se continúa con la definición y clasificación de plásticos, para luego enfocar el tema de residuos plásticos y

su gestión, planteando también las técnicas más usadas para el aprovechamiento y valorización de residuos plásticos y finalmente se detalla el sistema de codificación de la Sociedad de la Industria de Plásticos para la identificación de residuos plásticos presentado en la Norma INEN 2634:2012.

En el capítulo 2, se describe el proceso de pirólisis, su evolución en el tiempo y los diversos países en los que ha sido desarrollada, además se presentan los principales parámetros que influyen en dicho proceso, los productos que se obtienen del mismo, y los reactores que pueden ser utilizados para llevar a cabo las reacciones pirolíticas, finalmente se da una breve explicación de las técnicas utilizadas para el análisis y caracterización de la pirólisis.

El Capítulo 3, comprende la metodología que se desarrolla para el cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación, concerniente a la clasificación y tratamiento de residuos plásticos, a los ensayos pirolíticos realizados con diferentes parámetros y a los análisis de la fracción líquida obtenida.

En el capítulo 4, se muestran los resultados en base a los datos obtenidos durante la investigación y se realiza el análisis estadístico de los mismos, tanto de la clasificación de residuos plásticos en el Universidad Politécnica Salesiana, así como de los diferentes ensayos realizados con el respectivo análisis (físico) de la fracción líquida producida durante dichos ensayos.

Finalmente, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente estudio.

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

- Ejecutar el estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar los residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana.
- Validar el prototipo de pirólisis con el que cuenta la Universidad Politécnica Salesiana.
- Determinar los factores óptimos para desarrollar el proceso de pirólisis.
- Determinar los productos y residuos que puede generar el proceso de pirólisis.

# CAPÍTULO 1

## PLÁSTICOS

Existen alrededor de 50 familias diferentes y centenares de variedades de plásticos (ACRR et al, 2004), debido a su versatilidad, bajo costo, baja densidad y demás características están presentes en prácticamente todas las actividades humanas, en especial en el comercio, la industria, los servicios y las actividades domésticas (Junquera, 2010).

Es por ello, que los plásticos han remplazado a otros materiales tradicionales como los metales, cerámicas y maderas, en muchas de sus aplicaciones, pero su desarrollo también se centra en aplicaciones nuevas como la microelectrónica, biomedicina y comunicaciones (Salinas Villacis & Vasquez Fuel, 2010), esto provoca una mayor demanda por parte de los consumidores, esta es una de las razones por las cuales, a partir de 1950, la producción de plásticos a nivel mundial ha aumentado una media de un 10% anual (Aracil Sáez, 2008), es así que, en dicho año se generaban 1,7 millones de toneladas de plásticos en todo el mundo, ya para el 2005 fueron 230 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2007).

De acuerdo a las estadísticas del año 2005 se estima que el consumo anual de productos plásticos en los países desarrollados fue más de 100 Kg/habitante mientras que en Latinoamérica se tenía un consumo de 40 Kg/habitante (Leiva Chacón & Torres Gualpa, 2007).

Considerando lo establecido por la Comisión Europea (2013), *“se calcula que en 2008 en la Unión Europea (EU-27) se generaron unos 25 Mt de plástico. De este total, 12,1 Mt (el 48,7 %) se depositaron en vertederos, mientras que 12,8 Mt (el 51,3 %) se destinaron a recuperación y solo 5,3 Mt (el 21,3 %) se reciclaron. Aunque la previsión*



*hasta 2015 apunta a un incremento global del 30 % del nivel de reciclado mecánico (de 5,3 Mt a 6,9 Mt), se prevé que el depósito en vertederos y la incineración con recuperación de energía sigan siendo las vías predominantes de gestión de los residuos”.*

En Ecuador en el año 2002 se producían 336 ton/día de residuos plásticos de origen doméstico, industrial y agroindustrial, esto según el Análisis Sectorial de Residuos Sólidos Ecuador realizado por la Organización Panamericana de la Salud.

Según datos obtenidos de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), en Cuenca se genera alrededor del 22% por año de plásticos del total de materiales reciclables, es decir, 18 mil toneladas.

La creciente demanda de productos plásticos se ve reflejada en una problemática ambiental que tiene dos variantes:

- *La explotación de un recurso natural no renovable:* en la fabricación de plásticos se emplea el 4% del petróleo que se extrae en el mundo (MAVDT., 2008).
- *Problemas de disposición y tratamiento de residuos:* si bien los plásticos dentro de los residuos urbanos representan tan sólo el 7% en peso con relación a los demás materiales, en cuanto a volumen estos porcentajes se elevan notablemente, ocupando el 23% del total de residuos, debido a su baja densidad; esto según proyecciones internacionales (MAVDT., 2008).

Los plásticos se han acumulado en los ecosistemas, debido especialmente a sus características anticorrosivas y su resistencia a la intemperie y a la degradación de microorganismos (Espin, 2007). La degradación de los plásticos es muy lenta pudiendo tardar hasta 1000 años, y en este lapso de tiempo generan partículas de plástico más pequeñas que se almacenan en el ambiente (Hidalgo Loaiza, 2012).

Una de las características que hace tan atractivo el uso de plásticos en la mayoría de productos es su bajo peso, pero esto también trae consecuencias negativas para el medio ambiente puesto que, cuando son abandonados como residuos, los plásticos navegan por corrientes subterráneas, ríos, mares y océanos. A nivel mundial el principal impacto ambiental de los residuos plásticos es la contaminación de los océanos y mares, este es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios de todo el planeta (Téllez Maldonado, 2012).

La cantidad de residuos plásticos en los mares aumenta cada año con reportes de abundancia de 3 a 5 kg/km<sup>2</sup>, con registros de hasta 30 kg/km<sup>2</sup>. En el océano Pacífico la cantidad de microplásticos se ha triplicado en la última década; esto conlleva serios problemas estéticos y, lo que es aún más grave, el peligro que esto representa para los organismos marinos que sufren daños por ingestión y atragantamiento (Espin, 2007).

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 y reciclado químico, que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis, y aprovechamiento energético.

## **1.1.ANTECEDENTES**

El celuloide y la galatita son considerados como los primeros plásticos sintéticos obtenidos a partir de polímeros a los que se añadían sustancias plastificantes (USal, 2011). La producción de plástico se inicia cuando se crea el celuloide en 1869 por John Hyatt (Rodríguez Porca, 2010), lo cual da origen en 1884 a la película fotográfica (MAVDT, 2004); en 1895 Emil Bertiner genera la galatita, derivada de la caseína tratada con formol (García, 2009); y en 1909 Leo H. Baekeland obtiene la baquelita, el primer polímero totalmente sintético (Rodríguez Porca, 2010). Esto incentivó a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas para generar polímeros, de ahí que en la década de los 30, químicos ingleses crean el polietileno (PE) a partir de la

polimerización del gas etileno bajo la acción del calor y la presión; y, al remplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro, se produjo un plástico duro y resistente al fuego, el cloruro de polivinilo (PVC); también se crea el poliestireno y el nylon, pero esto en Alemania. Ya en 1942 nacen las melaminas, las resinas epoxi, el poliuretano y en 1952 el policarbonato (USal, 2011).

Con el pasar del tiempo, y gracias a los avances tecnológicos, se han ido desarrollando nuevos polímeros con mejores características, que se acoplan a las necesidades de la población, es por ello que en un periodo de diez años se calcula que los envases y embalajes de plástico han reducido su peso unitario un 28%, sin este logro los costos de producción y el consumo de energía serían el doble y el volumen de residuos se incrementaría un 150% (Salinas Villacis & Vasquez Fuel, 2010).

## **1.2. DEFINICIÓN**

Los plásticos son compuestos orgánicos que se generan a partir de simples moléculas de hidrocarburos, llamados monómeros, obtenidos del petróleo o del gas (Espin, 2007), estos forman polímeros más complejos luego de someterse a una polimerización, siendo este el material con el cual se fabrican los productos que demanda la población (ACRR et al, 2004), es decir, están conformados por largas cadenas macromoleculares que generalmente contienen en su estructura carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, cloro, flúor y bromo (MAVDT, 2004).

## **1.3. CLASIFICACIÓN**

Los polímeros o plásticos se pueden clasificar de diversas formas, de acuerdo a sus características, siendo todas igual de válidas (Berenguer Muñoz, 2008), para efecto de este proyecto se analiza la clasificación de acuerdo a su comportamiento frente al calor, en donde existen esencialmente dos familias de plásticos, los termoplásticos y los termoestables, que se diferencian por su estructura molecular (Conesa, 1996).

### **1.3.1. TERMOESTABLES**

Tienen una estructura molecular rígida que se produce durante su elaboración por entrecruzamiento molecular, están representados por poliúreas o poliuretanos que no pueden ser restablecidos o reprocesados, (Conesa, 1996). Es decir, son insolubles e incapaces de fundir ya que son materiales que adquieren un estado final reticulado (entrecruzado), debido a que no funden y no reblandecen presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas (Beltrán & Marcilla, 2012). Dentro de este grupo de plásticos se encuentran el poliéster insaturado, las resinas fenólicas y resinas epóxicas, principalmente (MAVDT., 2008).

### **1.3.2. TERMOPLÁSTICOS**

Se caracterizan por ser polímeros lineales que pueden estar ramificados o no, su estructura molecular no presenta entrecruzamientos por lo que son solubles en algunos disolventes orgánicos (Beltrán & Marcilla, 2012); poseen la particularidad de fluir de un estado fundido, cuando se calientan, a uno sólido, cuando se enfrían (Berenguer Muñoz, 2008). No tienen una estructura rígida y son principalmente poliolefinas, poliestireno y cloruro de polivinilo, al calentarse sus moléculas son libres de moverse y adoptar nuevas formas y posiciones (Conesa, 1996) puesto que el calor no modifica sus características físicas ni químicas es por ello que pueden ser reutilizados o reciclados muy fácilmente (Obra Colectiva Edebé, 2011).

Dentro de este grupo se hallan principalmente siete tipos de plásticos, que han sido codificados por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI) (ECOPLAS, 2011), los mismos se presentan en la Tabla 1:

*Tabla 1.- Clasificación de Termoplásticos Según la SPI*

<b>NÚMERO</b>	<b>ABREVIATURA</b>	<b>NOMBRE COMPLETO</b>
1	PET (en inglés PETE)	Polietilentereftalato
2	PE-AD (en inglés HDPE)	Polietileno de alta densidad
3	V, PVC	Vinilo, Policloruro de vinilo
4	PE-BD (en inglés LDPE)	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU). Acrilonitrilo-butadienestireno (ABS). Policarbonato (PC). Biopolímeros
<p>La base del código es un símbolo de forma triangular, integrado por tres flechas (símbolo de reciclaje), con un número específico en el centro que establece el tipo de plástico.</p> <p>En la mayoría de los envases plásticos el código está marcado en su parte inferior, aplicado por moldeo o impreso por algún otro método.</p>		

*Fuente: INEN, Disposición de desechos plásticos post-consumo, 2012.*

## **1.4. RESIDUOS PLÁSTICOS**

De acuerdo a Conesa (1996), los residuos plásticos son el conjunto de materiales a base de plásticos, resinas o productos poliméricos que deben ser reprocesados para su reutilización.

### **1.4.1. RESIDUOS PLÁSTICOS EN LOS RSU**

La composición de los residuos sólidos urbanos post-consumo varía de acuerdo a las características de la sociedad en donde se generan, dentro de éstas se puede mencionar: el poder adquisitivo de la población, la conciencia sobre la importancia de no contaminar el medio ambiente, la existencia de programas de separación en la fuente y de recolección selectiva de residuos sólidos, entre otros, (MAVDT, 2004).

Los residuos plásticos proceden de dos grandes grupos que son los residuos de fabricación y transformación y los residuos de post-consumo (Aracil Sáez, 2008):

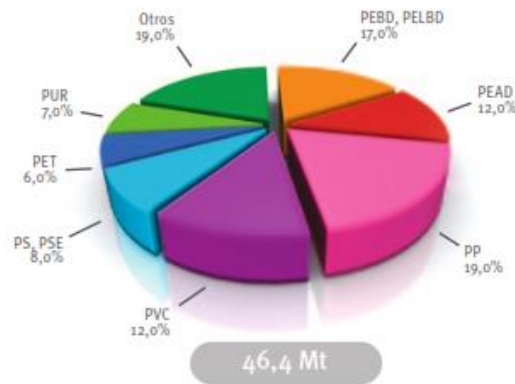
- Dentro de los residuos de fabricación y transformación se encuentran los diversos desperdicios de las plantas productoras de polímeros y de las plantas de transformación de los mismos en artículos plásticos (Aracil Sáez, 2008).
- Los residuos post-consumo, aquellos que se generan después de su uso, proceden aproximadamente en un 35% de los sectores de la distribución, construcción, automoción, industria, electrónica y agricultura, y el 65% restante proviene de los residuos sólidos urbanos (Aracil Sáez, 2008).

De un total de 170 millones de toneladas de plásticos consumidas en el mundo, más del 78% en peso corresponden a los termoplásticos, entre los cuales se encuentran el polietileno de baja y alta densidad (LDPE y HDPE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y polietilentereftalato (PET), y dentro del 22% se encuentran los termoestables, principalmente resinas epóxicas y poliuretano (PU), (Leiva Chacón & Torres Gualpa, 2007).

Como se muestra en el Gráfico 1, las familias de residuos plásticos con mayor volumen de generación en Europa son cinco, mismas que representan el 74% de toda la demanda de plásticos; de estos, los que constituyen el mayor porcentaje son el polietileno, que

incluye el de baja densidad (PEBD), el lineal de baja densidad (PELBD) y el de alta densidad (PEAD) con el 29%, polipropileno (PP) con el 19% y policloruro de vinilo (PVC) con el 12% y en menor cantidad se encuentra el poliestireno (PS sólido y PS expandido) y polietilentereftalato (PET), (PlasticsEurope, 2011).

*Gráfico 1.- Generación por tipo de plástico en Europa*



*Fuente:* (PlasticsEurope, 2011)

## **1.4.2. GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

El manejo de residuos plásticos es el conjunto de procedimientos y políticas dentro de una gestión ambiental económicamente apropiada, en el que se incluyen diferentes procesos y operaciones, como son: generación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final (Hidalgo Loaiza, 2012).

El tratamiento de los residuos plásticos también se basa en el conjunto de las tres “eres” (reducir, reutilizar y recuperar), como el resto de residuos con ciertas particularidades debidas a las características propias de estos materiales (Aracil Sáez, 2008).

***Reducción en origen o en la fuente***, este es el primer paso para una correcta gestión de residuos, consiste en diversas actividades que tienden a disminuir el uso de plásticos en la elaboración de productos manteniendo su calidad y eficacia en la prestación de

servicios, lo que a la postre significa una reducción en la generación de residuos (MAVDT., 2008) (Aracil Sáez, 2008).

**Reutilización**, luego de generados los residuos el siguiente paso es el reciclaje que permite utilizar los residuos en nuevas actividades o productos, aumentando la vida útil de los materiales y disminuyendo, de esta manera, el uso de materia prima; debido a sus diferentes características (duraderos, lavables, resistentes, esterilizables, etc.) los residuos plásticos son materiales especialmente adecuados para su reutilización (MAVDT., 2008) (Aracil Sáez, 2008).

**Recuperación**, se aplica a aquellos residuos que, a pesar de haber impulsado la reducción y una correcta reutilización, estos se generan de todas maneras; sin embargo, también pueden ser aprovechados a través del reciclado mecánico, el reciclado químico y la recuperación energética, que son las tres alternativas existentes para los residuos plásticos (Aracil Sáez, 2008).

Para lograr una correcta gestión de los plásticos, se debe considerar una jerarquización de las acciones de manejo, dando prioridad a las actividades que apuntan a la minimización de los residuos, después se deben plantear alternativas para el aprovechamiento de los materiales y finalmente, si las demás acciones no son aplicables, se debe realizar una disposición final adecuada de los mismos (MAVDT., 2008).

## **1.5. TÉCNICAS PARA EL APROVECHAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS**

En los países industrializados se han desarrollado en gran escala dos métodos tecnológicos de recuperación de los desechos plásticos: la incineración con recuperación de energía y el reciclado mecánico (PNUMA, 2002).



En la Tabla 2 se presentan los porcentajes de uso de las técnicas de aprovechamiento de plásticos en la Unión Europea en 1994, aquí se evidencia claramente que predomina la eliminación en vertederos y la recuperación de energía; y el reciclado químico casi no se emplea.

*Tabla 2.- Métodos tecnológicos de recuperación de los desechos plásticos en la Unión Europea en 1994*

<b>MÉTODO</b>	<b>% USO</b>
Reciclado Mecánico	6
Recuperación de energía	13,4
Incineración sin recuperación de energía	3,1
Eliminación en vertederos	76
Exportados fuera de la Unión Europea	1,2
Reciclado Químico	Marginal

*Fuente: (PNUMA, 2002)*

A continuación se realiza una explicación de los métodos que en la actualidad han ido tomando mayor peso, entre los cuales se encuentran el reciclado mecánico, reciclado químico y recuperación de energía.

### **1.5.1. RECICLADO MECÁNICO**

Mediante este proceso se obtienen materias primas secundarias, en donde los residuos plásticos son sometidos a presión y calor para transformarse en otros objetos iguales o distintos a los iniciales pero con las propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original (Aracil Sáez, 2008) (Espinoza, 2009).

Para que este proceso tenga buenos resultados se requiere que los plásticos a reciclar sean de gran tamaño, homogéneos, libres de impurezas y contaminantes, además los termoplásticos son termodinámicamente incompatibles, es decir que presentan temperaturas de fusión diferentes que varían entre los 80 y los 240°C, por lo tanto es necesario que cada resina sea tratada por separado para obtener materias primas secundarias que cumplan con las especificaciones de calidad del mercado (MAVDT., 2008).

La aplicación de este método se limita a un porcentaje reducido de residuos plásticos, por tres razones primordiales (Alonso Morales M. N., 2008):

- Los plásticos reciclados generalmente deben mezclarse con plástico virgen, debido a que los plásticos durante su vida útil y su eliminación pierden sus propiedades.
- Los residuos plásticos deben ser separados homogéneamente, no deben existir mezclas de tipos de plásticos y además deben estar completamente limpios.
- Se limita exclusivamente a los polímeros termoplásticos, ya que son los únicos que se pueden moldear una y otra vez sin que pierdan sus características iniciales

## **1.5.2. RECICLADO QUÍMICO**

Mediante un proceso químico se descomponen los plásticos usados en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos; este proceso no exige homogeneidad de los materiales, sino se puede hacer con mezclas de distintos polímeros, incluso se puede trabajar con los plásticos termoestables y plásticos de composición compleja (Espinoza, 2009), de esta manera se reducen los costos de selección. Con esta técnica se pueden recuperar los residuos plásticos que no han podido

ser aprovechados en el reciclado mecánico como plásticos compuestos, partes de automóviles, cables, tapetes, textiles, etc.

A pesar de todas estas ventajas, el reciclaje químico se encuentra aún en etapa experimental avanzada (MAVDT., 2008), ubicándose en una fase menos desarrollada que el reciclado mecánico (Aracil Sáez, 2008), sin embargo promete ser una alternativa ambiental, social y económicamente viable para el aprovechamiento de los residuos plásticos (MAVDT., 2008).

Existen diferentes procesos para realizar el reciclaje químico: la pirólisis, la hidrogenación, la gasificación o el tratamiento con disolventes (Espinoza, 2009).

**Despolimerización:** consiste en el proceso inverso para la obtención del plástico, se parte de un polímero que es descompuesto en monómeros que pueden volver a ser utilizados como materias primas. Este proceso se puede desarrollar por vía térmica o química, mediante reacciones de hidrólisis, metanólisis, alcoholólisis o glicólisis; para lograr buenos resultados se debe disponer de materia prima bien definida, es aplicable a polímeros de policondensación (PET y poliamidas) y algunos de adición (poliuretanos) (Aracil Sáez, 2008).

**Gasificación:** se produce la oxidación parcial de las cadenas poliméricas donde se sintetiza monóxido de carbono e hidrógeno, que se pueden utilizar como materia prima para la producción de metano, amoníaco o alcoholes, como combustible para generar electricidad, o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo. Presenta como ventaja el hecho de que no requiere la separación previa de los residuos, y es la técnica más desarrollada del reciclado químico (Aracil Sáez, 2008).

**Pirólisis:** proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C, obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables, dichos productos (metano, etileno, propileno o benceno) pueden ser

reutilizados por la industria petroquímica o ser empleados como combustibles, en este proceso se puede trabajar con todo tipo de residuos plásticos o cuya separación es inviable. La pirólisis puede ser térmica o catalítica (se utiliza un catalizador ácido como las zeolitas) (Aracil Sáez, 2008).

### **1.5.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO**



Se libera energía térmica mediante el calentamiento del residuo plástico, en donde el plástico es usado como combustible en diferentes procesos debido a su elevado poder calorífico, aquí se pueden aprovechar todo tipo de plásticos incluso aquellos que presenta deterioro o suciedad como aquellos que proceden de la agricultura o de los residuos sólidos urbanos. A este proceso se considera medioambientalmente más conveniente que el reciclado químico o mecánico (Aracil Sáez, 2008).



### **1.6. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS**



En el Ecuador, los plásticos están identificados de acuerdo al sistema de codificación de la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), para lo cual se considera el tipo de resina con la que se han fabricado dichos plásticos, en la tabla que presenta la NTE INEN 2634:2012 (Disposición de desechos plásticos post-consumo, requisitos) sobre los “Usos más comunes de los plásticos” (INEN, 2012), de esta manera se tiene siete tipos de plásticos, los cuáles están considerados dentro de los termoplásticos descritos anteriormente.


La codificación internacional de la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), permite una fácil identificación de los residuos plásticos, ya que cada tipo de plástico tiene un código único referente a sus características, a continuación en la Tabla 3 se presenta la descripción que hace la norma INEN de cada uno de ellos:

*Tabla 3.- Codificación internacional de la Sociedad de la Industria de Plásticos*

CÓDIGO DE LA RESINA	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES DEL PRODUCTO
	<p><b><i>Polietilentereftalato</i></b></p> <p>PET es claro, duro y tiene buenas propiedades de barrera de gas y humedad. Esta resina se utiliza comúnmente en botellas de bebidas y muchos contenedores de productos de consumo elaborados por moldeo por inyección. Copos/hojuelas y «pellets» limpios de PET reciclado tienen gran demanda para el hilado de fibra para alfombra, producción de fibra de relleno y geotextiles. Conocido como poliéster.</p>	<p>Botellas plásticas para bebidas ligeras, agua, jugo, bebidas deportivas, cerveza, enjuague bucal, salsa de tomate y aderezo. Frascos de comida, para aceite de cocina, mantequilla de maní, jalea, mermelada y encurtidos. Películas para hornos, bandejas de comida para microondas.</p>
	<p><b><i>Polietileno de Alta Densidad</i></b></p> <p>Es utilizado para elaborar diversos tipos de envases. Los envases no pigmentados son translúcidos, tienen buenas propiedades de barrera y rigidez y son adecuados para envasado de productos con una corta vida de estante como la leche. Debido a que el HDPE tiene buena resistencia química, se usa para el envasado de muchos productos químicos</p>	<p>Envases para lácteos, agua, jugo, cosméticos, champú, detergente para platos y lavandería y limpiadores domésticos. Bolsas para alimentos y compras al por menor. Fundas de cajas de cereales. Contenedores reutilizables.</p>

<b>CÓDIGO DE LA RESINA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>APLICACIONES DEL PRODUCTO</b>
	domésticos e industriales tales como detergentes y lejía. Las botellas pigmentadas de HDPE tienen mejor resistencia al estrés por agrietamiento que aquellas de HDPE no pigmentado.	
	<p><b>Cloruro de Polivinilo</b></p> <p>Además de sus propiedades físicas estables, el PVC tiene buena resistencia química, resistencia a la intemperie, características de flujo y propiedades eléctricas estables. La diversa lista de productos de vinilo puede dividirse ampliamente en materiales rígidos y flexibles.</p>	<p>Aplicaciones de embalaje rígido incluyen ampollas y recipientes con bisagras para comida para llevar. El uso en envases flexibles incluyen bolsas para ropa de cama y ropa médica, delicatesen y presentan utilidad para embalajes y resistencia a la manipulación.</p>
	<p><b>Polietileno de Baja Densidad</b></p> <p>LDPE se utiliza principalmente en aplicaciones de película debido a su dureza, flexibilidad y relativa transparencia, y es de uso común en aplicaciones donde es necesario el sellado mediante calor. El LDPE también se utiliza para fabricar algunas tapas flexibles y botellas, así como en aplicaciones sobre alambres y</p>	<p>Bolsas y envolturas transparentes o pigmentadas. Bolsas para limpieza en seco, periódicos, pan, alimentos congelados, productos frescos y basura doméstica. Termoencogibles y película de estiramiento (stretch film). Recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de</p>

CÓDIGO DE LA RESINA	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES DEL PRODUCTO
	cables. Incluye al Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).	contenedores. Juguetes.
	<p><b>Polipropileno</b></p> <p>El PP tiene buena resistencia química, es fuerte y tiene un elevado punto de fusión por lo que le da aptitud para ser llenado con líquidos en caliente. Esta resina se encuentra en embalajes flexibles y rígidos, fibras y grandes piezas moldeadas para automóviles y productos de consumo.</p>	<p>Contenedores para yogur, margarina, comidas para llevar y alimentos gourmet. Botellas de medicamentos y cosméticos. Tapas de botellas y cierres. Sorbetes Botellas de salsa de tomate y jarabe.</p>
	<p><b>Poliestireno</b></p> <p>PS es un plástico versátil que puede ser rígido o espumoso. El poliestireno de uso general es claro, duro y quebradizo. Tiene un punto de fusión relativamente bajo. Las aplicaciones típicas incluyen el embalaje de protección, envases de alimentos, botellas.</p>	<p>Artículos para servicios de alimentos, tales como tazas, platos, cuencos, cubiertos, recipientes con bisagras para comida para llevar, bandejas de carne y aves de corral, envases rígidos para alimentos (por ejemplo, yogur). Estos artículos pueden ser elaborados con PS en forma espumosa o no espumosa. Espuma de embalaje de protección para muebles, aparatos</p>

CÓDIGO DE LA RESINA	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES DEL PRODUCTO
		electrónicos y otros objetos delicados.
	<p><i>Otros</i></p> <p>El uso de este código indica que un paquete/envase/embalaje está elaborado con una resina, distinta a las seis anteriormente enlistadas o está compuesta por más de una resina y se utiliza en una combinación de múltiples capas. Incluye al poliuretano (PU), acrilonitrilobutadienoestireno (ABS), policarbonato (PC), resina acetal.</p>	<p>Botellas de agua reutilizables de tres y cinco galones, algunas botellas de jugos cítricos y salsa de tomate. Bolsas de cocción al horno, capas de barrera y el embalaje a medida. Piezas de grifería y de vehículos. Discos compactos, techo traslúcido, armazones. El PU se emplea principalmente como aislante de temperatura. El ABS es un plástico duro empleado en perfiles, tuberías, defensas de automóviles y juguetes. Los discos compactos y garrafones de agua están hechos de PC.</p>

Fuente: NTE INEN 2634:2012



# CAPÍTULO 2

## PIRÓLISIS

La pirólisis, se ha considerado como una opción para el tratamiento químico de residuos sólidos urbanos; tratándose de un complejo proceso fisicoquímico siendo tema de estudio en numerosos países, sobre todo en los desarrollados. Su objetivo, es la reducción de dichos residuos para ser transformados en materiales que puedan ser aprovechados energéticamente, o usados como materia prima de ciertos procesos industriales (SEDESOL, 2001), (Botello, Avalos, & Camporredondo, 2010).

El tratamiento térmico mediante pirólisis convierte los residuos plásticos en combustibles e hidrocarburos valiosos, resolviendo no sólo el problema de acumulación de desechos en los rellenos sanitarios, sino que, además se da la recuperación energética de los mismos ( Lee & Cheon Oh, 2009).

Los polímeros sometidos a pirólisis son degradados, produciendo aceite y gas, dejando un residuo sólido carbonoso. El gas producido, puede ser utilizado para proveer de energía al mismo proceso de pirólisis (Cunliffe, Jones, & Williams, 2013).

En España, se han realizados experimentos de pirólisis, en los que se comprobó que a mayor temperatura, se da la formación de compuestos más estables térmicamente (Aracil Sáez, 2008). En el mismo país, en la Universidad de Alicante, un estudio de pirólisis muestra que la descomposición del polietileno se da en su totalidad a temperaturas entre 500 y 900°C, pues no se han encontrado residuos después del proceso (Conesa, 1996).

De igual manera, en Colombia, al pirolizar los residuos sólidos municipales se obtuvieron productos con alto poder calorífico por el uso de compuestos con alto

contenido de carbono (plásticos, textiles, papel y cartón), en los ensayos se obtuvieron tres fracciones: coque, gases y líquidos (Almeida Gamarra, 2006).

En Ecuador, en los experimentos realizados por (Proaño & Crespo, 2009), usando polietileno de alta densidad, se obtuvieron las tres fracciones de pirólisis (sólido, líquido y gas), y se determinó que a temperaturas de 250-300°C el material a pirolizar se funde en la base del reactor y no se obtienen productos líquidos. A parte de la temperatura, el tiempo total de la reacción también influye en la cantidad de productos (sólido, líquido y gas) que se obtienen. Con un tiempo de reacción de 30 minutos a 400°C la fracción sólida es la que predomina en cantidad, mientras que a la misma temperatura y con tiempo de reacción de una y dos horas, es la fracción líquida la predominante; teniendo como parámetros más óptimos 400°C y 2 horas en donde se produjo mayor cantidad de líquido con un porcentaje de 76,72%. A una temperatura máxima de destilación de 200°C, el rendimiento total del proceso de pirólisis de polietileno fue de 32,64% para generar combustibles líquidos.

## **2.1. ANTECEDENTES**

El ser humano aprovechaba el potencial energético de la madera desde tiempos muy remotos, los egipcios realizaban procesos de pirólisis de este material para la obtención de carbón, alquitrán y ácidos piroleñosos (para embalsamar); en la Inglaterra feudal también se utilizaban estos métodos, y se transmitían de padres a hijos para no compartirlo en escritos. En la I guerra mundial los procesos sintéticos reemplazaron a este método, y en la II guerra mundial, Europa, Asia, Latinoamérica y Australia desarrollaron “*sistemas de gasificación de biomasa*” que se dejaron de lado en su mayoría cuando los combustibles líquidos tuvieron precios más accesibles. Por la década de los 70, se consideró a la pirólisis y gasificación ya no solo como sistema generador de energía, sino también para la eliminación de residuos (Mendis, 1989 citado por (Conesa, 1996)).

En la década de los 80, se desarrolló en Japón, a gran escala, pirólisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad con los gases generados, sin embargo posteriormente, el precio de los crudos descendió a menos de la mitad, produciendo la suspensión de proyectos como estos. (Helt *et al.*, 1984 citado por (Conesa, 1996)). De igual manera en dicha década, se desarrolló tecnologías para conseguir el aumento de bioaceite producido en el proceso de pirólisis, en Europa y América del Norte. Pyrovac, con presiones de 15 kPa y temperaturas entre 450°C tuvo rendimientos de hasta 47% p/p; La Universidad de Twente (Holanda) desarrolló un reactor cónico rotativo con rendimiento de 60%p/p , (choque tangencial de partículas de biomasa con paredes del pirolizador); en Canadá, Dynamotive, obtuvo aceites trabajando con reactores de lecho fluidizado, en instalaciones de combustión de carbón dichos aceites se aplicaron para refinamiento de emisiones de SOx y NOx y su control; se desarrollaron otros proyectos referentes especialmente al uso de catalizadores en reactores de lecho fluidizado en Bélgica, Gran Bretaña, USA y Suiza, en los que se procesó biomasa (Fajardo Villaquiran, 2011).

De la pirólisis de madera, se han obtenido de unos veinte productos químicos distintos, pero la viabilidad de este proceso está en función de las fluctuaciones del mercado (Conesa, 1996).

La generación de productos líquidos, sólidos y gaseosos es lo que sitúa en ventaja a la pirólisis sobre la incineración; sin embargo, en la pirólisis resulta complejo un aumento de la selectividad del proceso (Conesa, 1996).

## **2.2. DEFINICIÓN**

La pirólisis es un proceso que se desarrolla en ausencia de oxígeno, bajo una atmósfera inerte y con temperaturas externas (endotérmica) para la conversión termoquímica de sustancias. Los componentes más importantes que se obtienen de este proceso son tres fracciones: sólida (carbono o coque), líquida (alquitrán, aceites) y una fracción gaseosa

(Almeida Gamarra, 2006). En dicho proceso, la cantidad de las fracciones obtenidas está en función de los compuestos que sean pirolizados y de los parámetros bajo los cuales se dé la pirólisis (Aracil Sáez, 2008).

Las tecnologías de pirólisis presentan tres aspectos fundamentales que las diferencian: la temperatura del proceso, la clase de equipo utilizado y la técnica de calentamiento (Parres García, 2005).

El proceso se denomina gasificación cuando se concentra en la producción de gas combustible o gas de síntesis. El proceso de gasificación se da a altas temperaturas, de manera que se descompone completamente las estructuras químicas originales. En comparación con la quema directa de plásticos, los procesos de pirólisis y gasificación son mucho más fáciles de controlar. La conversión térmica, en el tema de factibilidad, tiene mejores resultados usando tecnología de lecho fluidizado (Wiley Series in Polymer Science , 2006).

### **2.3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN**

**Composición del material a pirolizar:** el producto obtenido está en función al material que ingresa (Aracil Sáez, 2008).

**Temperatura:** esta variable determina la velocidad de descomposición térmica así como la estabilidad de las materias primas que ingresan, y de igual manera influye en los productos obtenidos. Las elevadas temperaturas, mayores a 600°C, dan lugar a pequeñas moléculas gaseosas simples; mientras que los productos líquidos más viscosos, se producen a temperaturas menores a 400°C (temperaturas bajas) y a presiones más altas. En la mayoría de los plásticos, el proceso de pirólisis inicia alrededor de los 300°C, aunque para algunas resinas termosensibles el proceso puede iniciar antes; también la presencia de aditivos (estabilizantes, plastificantes y pigmentos) influye en el inicio de la

reacción. Por lo general, se selecciona una temperatura media entre 400°C a 500°C para el proceso (Wiley Series in Polymer Science , 2006).

**Humedad:** este parámetro influye en la temperatura, puesto que se empleará calor para evaporar el agua que pueda contener la muestra, haciendo que el proceso de pirólisis se realice a menor temperatura que la considerada en un principio (Aracil Sáez, 2008).

**Presión:** esta condición tiene efecto tanto en el proceso de pirólisis como en la obtención de productos, se ha determinado que a presiones elevadas el rendimiento de gases no condensables incrementa, con la consecuente disminución de producto líquido (Gao, 2010).

**Velocidad de calentamiento:** este parámetro y la temperatura, son de gran importancia en la pirólisis; pudiendo clasificarse en pirólisis lenta y pirólisis flash. En la pirólisis lenta, que tiene tiempos de reacción de horas o días, es la reacción química la que controla el proceso de descomposición (facilita la obtención de la fracción sólida), y en la pirólisis flash la transmisión de calor es la que controla la descomposición (facilita la formación de líquidos a temperaturas > 650°C y a mayores temperaturas la obtención de gases) (Aracil Sáez, 2008). Siendo la velocidad de calentamiento, el tiempo requerido para calentar las partículas, desde temperatura ambiente hasta la temperatura de su completa descomposición (Conesa, 1996).

**Tiempo de residencia:** un extenso tiempo de residencia de los compuestos volátiles, favorece la formación de compuestos gaseosos (Aracil Sáez, 2008). La temperatura de reacción es la que marca principalmente el tiempo de reacción que se necesita. (Wiley Series in Polymer Science , 2006).

**Catalizadores:** Se puede clasificar en pirólisis catalítica o térmica, dependiendo del uso o no de catalizadores. La pirólisis catalítica, admite trabajar a rangos de temperatura más bajos, y en función de los catalizadores utilizados, es más selectivo en los productos

obtenidos (Aracil Sáez, 2008). Los catalizadores influyen en el mecanismo de reacción, pudiendo acelerar la descomposición de los compuestos (Wiley Series in Polymer Science , 2006).

En la Tabla 4, se presentan las diferentes condiciones bajo las cuales se desarrollan los procesos de pirólisis y los productos que se obtienen.

*Tabla 4.-Condiciones del proceso de pirólisis y productos*

<b>Proceso</b>	<b>Velocidad de calentamiento</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Productos</b>
<b>Carbonización</b>	Muy baja	Días	450- 600	Carbón
<b>Pirólisis lenta</b>	10-100K/min	10-60min	450- 600	Gas, aceite, carbón
<b>Pirólisis rápida</b>	Superior a 1000K/s	0.5-5s	550-650	Gas, aceite, (carbón)
<b>Pirólisis flash</b>	Superior a 10000K/s	<1s	450-900	Gas, aceite, (carbón)

*Fuente: (Gao, 2010)*

## **2.4.PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS**

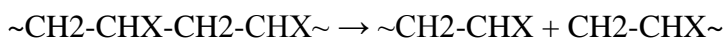
### **2.4.1. DESCOMPOSICIÓN PIROLÍTICA**

Al someter a los plásticos a temperaturas elevadas, las cadenas largas de polímeros que los forman, se descomponen en compuestos de cadenas cortas. Los plásticos al ser sustancias de peso molecular alto, pueden ser aprovechados cuando se descomponen sus

macromoléculas en fragmentos más pequeños; por lo que, si no son degradados previamente, no pueden ser purificados con procesos de extracción, destilación, o cristalización (Elias Castells & Velo García, 2005).

Resulta difícil describir mediante reacciones químicas el proceso de pirólisis de plásticos, debido a que dichas reacciones pueden variar, por ejemplo, por la intervención de catalizadores (Wiley Series in Polymer Science , 2006).

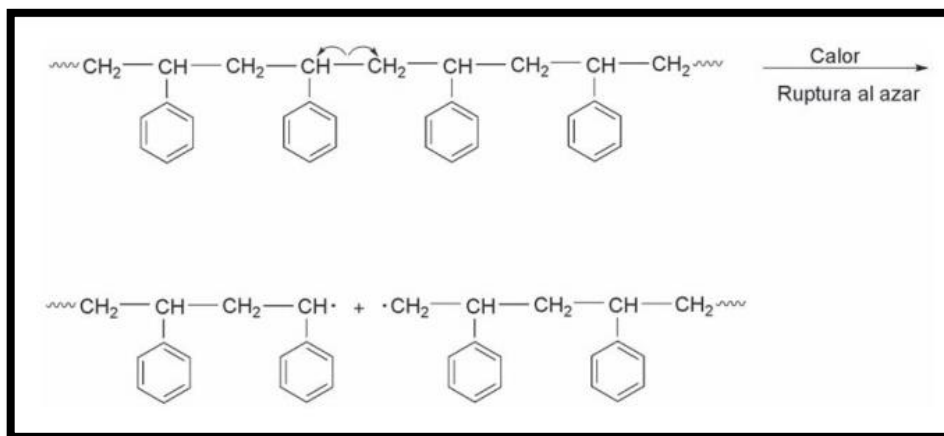
Sin embargo, se puede mostrar como fórmula general la siguiente:



“Donde X dependiendo de la poliolefina puede ser un hidrógeno, un halógeno o un grupo alquilo, entre otros” (Navarro Martínez, 2007).

En la Ilustración 1 se da un ejemplo de descomposición pirolítica:

*Ilustración 1.- Reacción de termo- descomposición del poliestireno*



Fuente: (San Andrés, Chércoles, De La Roja , & Gómez, 2010)

De acuerdo a la conservación de la materia, tanto los productos que ingresan como los que salen deben ser relativamente iguales en su composición y en sus cantidades; por lo tanto, la estructura del producto, está relacionada directamente a la estructura del polímero de entrada. Como regla se tiene que, a elevadas temperaturas la rotura de enlaces se ve favorecida (Wiley Series in Polymer Science , 2006) .

La fracción gaseosa obtenida de la pirólisis, se considera como un combustible de alto poder calorífico, pudiendo ser utilizado en la fase de calentamiento del mismo proceso (Kaminsky, 1993); siendo los principales componentes de la misma, en la pirólisis de residuos plásticos, el metano, etano, etileno y propileno. En la pirólisis de PVC se obtiene principalmente ácido clorhídrico (Conesa, 1996).

La fracción líquida se compone de hidrocarburos alifáticos de peso molecular alto, en función al residuo plástico pirolizado (Alonso Morales M. N., 2008), la misma que puede ser empleada como combustible ( Lee & Cheon Oh, 2009).

La fracción sólida o residuo carbonoso obtenida de la pirólisis de polímeros, puede usarse como carbón activado, pasando previamente por un proceso de activación (Almazán , 2006).

La presencia de ciertos átomos como son el cloro y el bromo, trae dificultades al proceso debido a que éstos formarán parte de los productos sólido, líquido y gaseoso lo que disminuirá su valor en el mercado, por lo que, continuamente se buscan maneras de eliminarlos en los procesos para plásticos mezclados (Wiley Series in Polymer Science , 2006). Otro inconveniente que puede presentarse es la formación de dioxinas y furanos al trabajar con elevadas temperaturas, pudiendo evitarse dicha formación con el uso de un catalizador, ya que este permite la disminución de temperatura (Berenguer Muñoz, 2008).



## **2.5. REACTOR DE PIRÓLISIS**

Es la unidad donde ocurre una o varias reacciones químicas. Este equipo se compone de una cámara cerrada que dispone de entradas y salidas para el material y demás compuestos usados en la reacción (Ramírez García & Katime, 2005) (Alvarado Franco, 2005).

### **2.5.1. TIPOS DE REACTORES**

Se pueden clasificar de acuerdo al proceso de alimentación y retirada del producto, en Batch (discontinuo, intermitente), semi-batch y continuo (Gao, 2010).

- **Reactor Batch (intermitente o por lotes)**

Este reactor se caracteriza porque los reactantes se colocan en su interior, dejando que reaccionen por un tiempo determinado antes de extraer los compuestos resultantes. Este tipo de reactor permite trabajar con tamaños de muestra pequeños y con un adecuado control de la reacción a nivel de laboratorio (Alvarado Franco, 2005).

- **Reactores continuos**

Son aquellos en los que se introduce en una parte del reactor los materiales a pirolizar y se obtienen en otra parte del reactor los productos (Gao, 2010), es decir, que se mantiene un flujo continuo de entrada de material y salida de productos, a lo largo del proceso.

- **Reactores semi-batch o semicontínuos**

Desalojan los productos continuamente una vez que son generados, pero los materiales a ser pirolizados o de entrada, son ingresados antes de que inicie el proceso (Gao, 2010).

## **2.6. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS**

### **2.6.1. CROMATOGRAFÍA DE GASES**

Se utiliza la técnica de cromatografía de gases, siendo esta un método físico que tiene por objetivo la separación de los diferentes componentes que se encuentran en una mezcla para cuantificarlos y cualificarlos. Por lo tanto, cumple dos funciones primordiales: separación de componentes y medición de su proporción dentro de la mezcla (Parrales, Reyes Vera, & Pine Tobar, 2012). Se considera como una herramienta de gran importancia en química por su sensibilidad y efectividad en la separación de componentes (Montoya & Páez, 2012).

En síntesis, el proceso dentro de un cromatógrafo de gases es el siguiente: *“Un gas inerte fluye en forma continua desde un cilindro de gas a través del inyector, la columna y el detector. La velocidad de flujo del gas carrier se controla para asegurar tiempos de retención reproducibles y minimizar las variaciones y ruidos en el detector”* (Parres García, 2005).

Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) pueden estar compuestos de dos o más anillos bencénicos, se forman de la combustión incompleta del petróleo, madera, sustancias de origen orgánico, entre otras (Escorza Núñez, 2007).

### **2.6.2. EL DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR (DCA)**

Es un diseño en el cual los tratamientos son asignados en forma completamente aleatoria entre las unidades experimentales, es decir, no impone restricciones entre dichas unidades (Pedroza & Dicovskyi, 2006).

El diseño completamente al azar es sencillo y se utiliza cuando las condiciones del sitio experimental son homogéneas (Castillo, Mejía , & Arévalo, 2011).

- **ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)**

El análisis de varianza compara varios tratamientos para determinar la igualdad de los promedios, por lo tanto, *“el modelo ANOVA simple estudia las igualdades de más de 2 promedios, esto significa que estudia los efectos de más de dos "tratamientos," es decir, de la hipótesis nula  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$ , esto es, de que las varianzas de los promedios son igual a cero ( $\sigma^2\mu = 0$ )”* (Urias, 2006).

Mediante el software Minitab se emplea el análisis ANOVA, el cual de manera simple se explica a continuación:

- Se establece una hipótesis nula en la que todos los datos son iguales,
- Nivel de confianza del 95%,
- Nivel de significancia de 0,05
- De manera que si el valor p es mayor al nivel de significancia de 0.05 no existe una diferencia significativa; y en consecuencia se acepta la hipótesis nula.

- **TUKEY**

Tukey (1953) propuso un procedimiento para testar la hipótesis nula, con  $\alpha$  siendo exactamente el nivel global de significancia, cuando las muestras tienen tamaños iguales, y en el máximo, cuando las muestras tienen tamaños diferentes (Vivanco Pezantes, 2009).

# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

### **3.1. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Mediante el uso de la metodología tomada de la tabla 2 de la NTE INEN 2634:2012 “Disposición de desechos plásticos post-consumo, Requisitos” que se presenta en el Capítulo 1, se realiza la clasificación utilizando los números asignados según su composición de manera que se tendrá: 1PET, 2 PEAD, 3 PVC, 4 PE-BD, 5PP, 6PS, 7 otros.

La identificación se realiza distinguiendo el número al que pertenece el residuo plástico, el mismo que es colocado en el envase (plástico) por el fabricante para facilitar las labores de reciclaje (Ilustración 2). En caso de no presentarse el número, se determina mediante la función que desempeña el plástico antes de convertirse en residuo, de igual manera, basándose en las descripciones de usos de la metodología del INEN en el Capítulo 1.

La clasificación se efectúa en distintas fundas plásticas para facilitar su pesaje, como se muestra en la Ilustración 3.

*Ilustración 2.- Clasificación de residuos plásticos en la Universidad Politécnica Salesiana*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 3.- Plásticos clasificados en distintas fundas*



*Fuente: Las autoras*

Una vez pesados los residuos plásticos, se establece los de mayor peso, para conocer cuáles son los de mayor generación dentro del establecimiento.

### 3.2. PRE-TRATAMIENTO DE RESIDUO PLÁSTICO

Antes de ingresar el residuo plástico al reactor se debe:

- Retirar las etiquetas y tapas de los envases de PET (Ilustración 4),
- Lavar los envases que serán utilizados en el proceso,
- Ponerlos a secar (Ilustración 5) y,
- Triturarlos para que sean ingresados del mismo tamaño en el reactor (Ilustración 6).

*Ilustración 4.- Retiro de etiquetas*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 5.- Envases lavados y secos*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 6.- PEAD, PS y PET triturados*



*Fuente: Las autoras*

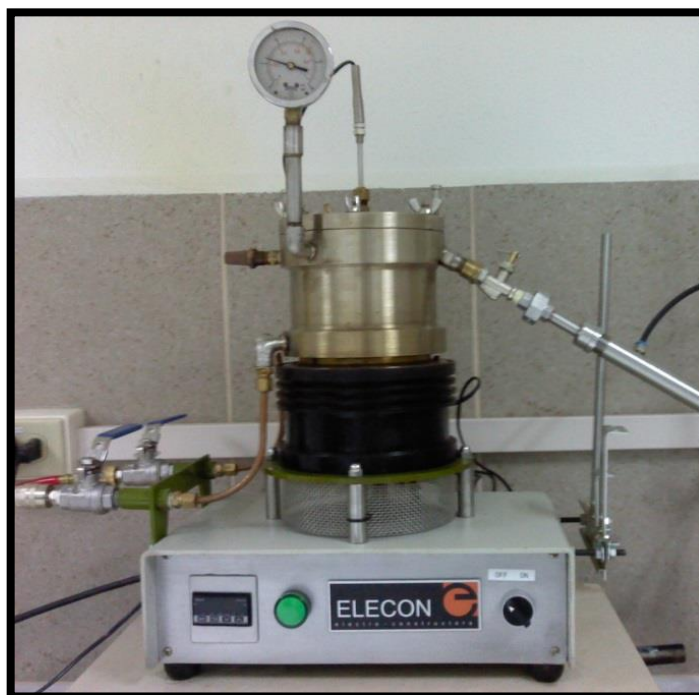
### **3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

El reactor utilizado cuenta con las siguientes características y elementos (Ilustración 7):

- Tipo semi batch
- 1,2 litros de capacidad
- Calentamiento eléctrico (niquelina)
- Termocupla
- Sistema de control térmico
- Manómetro con capacidad de 1 bar
- Entrada de aire a cámara de enfriamiento

- Entrada de gas inerte ( $N_2$ ) al interior del reactor
- Salida de productos
- Válvula de paso

*Ilustración 7.- Reactor de pirólisis*



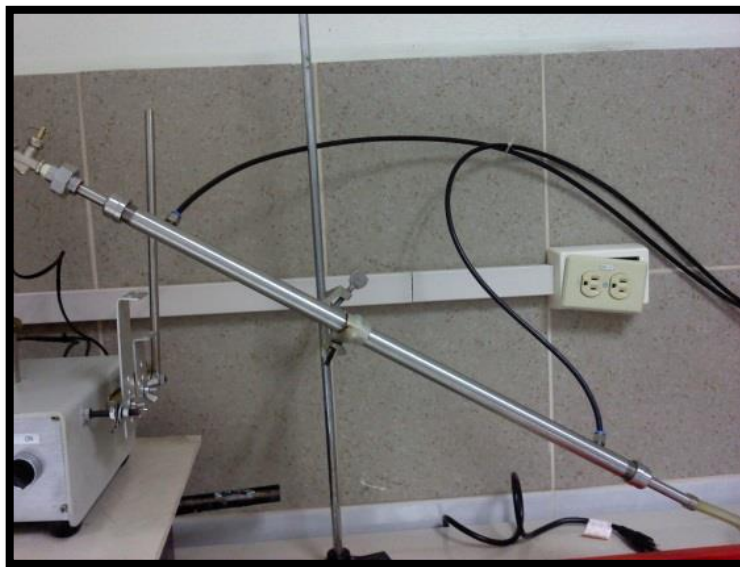
*Fuente: Las autoras*

### **Sistema de enfriamiento de gases de salida**

- Refrigerante metálico con circulación de agua a temperatura ambiente (Ilustración 8)
- 2 Erlenmeyer de 250ml refrigerados (Ilustración 9)
- Erlenmeyer de 1000ml para medir el volumen de gases



*Ilustración 8.- Refrigerante*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 9.- Matraces erlenmeyer refrigerados (250ml) y erlenmeyer para gases (1000ml)*



*Fuente: Las autoras*

### 3.4.PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA DAR INICIO AL PROCESO DE PIRÓLISIS

Se procede a pesar:

- Cápsula de porcelana vacía
- Cápsula de porcelana con plástico
- Erlenmeyer vacío

*Ilustración 10.- Capsula de porcelana vacía y cápsula de porcelana con plástico*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 11.- Erlenmeyer vacío*



*Fuente: Las autoras*

Una vez colocada la cápsula de porcelana con el plástico en el interior del reactor, se procede a cerrarlo herméticamente (Ilustración 12).

*Ilustración 12.- Reactor de pirólisis completamente sellado*



*Fuente: Las autoras*

Inmediatamente después se deja circular el gas nitrógeno (Ilustración 13) para desalojar el oxígeno que esté dentro del reactor.

*Ilustración 13.- Cilindro de gas nitrógeno*



*Fuente: Las autoras*

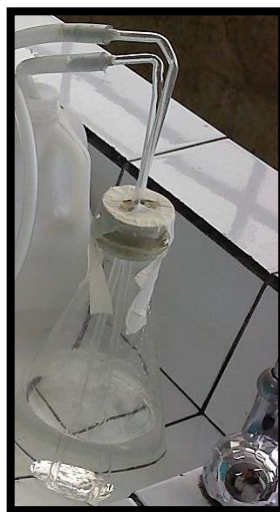
Se conectan los matraces erlenmeyer de 250ml que recolectan el líquido producido durante el proceso de pirólisis (Ilustración 14) y se llena de agua el erlenmeyer de 1000ml, para determinar el volumen de gases producido, mediante el desalojo de agua conforme ingresan dichos gases (Ilustración 15).

*Ilustración 14.- Matraces Erlenmeyer colectores de líquido*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 15.- Erlenmeyer para medir gases*



*Fuente: Las autoras*

Finalmente, se ajusta la temperatura y se pone en funcionamiento el software de registros de temperaturas (Ilustración 16).

*Ilustración 16.- Pantalla de ajuste e imagen de registro de temperatura*



*Fuente: Las autoras*

### **3.5. PROCESO GENERAL DE PIRÓLISIS**

En el interior del horno, se desarrolla el proceso de pirólisis en donde, se producen las reacciones demostradas en el capítulo 2.

Las variables que se manejan son la temperatura, el tiempo de residencia y tipos de residuos plásticos, las cuales se modifican de acuerdo al ensayo que se realice. Teniendo en consideración que la temperatura máxima que puede alcanzar el reactor es de 500°C.

La presión se establece como constante, debido a que el empaque no soporta una presión mayor a 9psi, considerando el empaque de teflón como el más óptimo entre el de nitrilo y de amianto (con una placa interna metálica); dicha presión es regulada a través de la válvula de paso.

Una vez que los gases ejercen una presión mayor a la de 9psi, inicia la evacuación de los mismos, pasando por los erlenmeyer refrigerados de 250ml y convirtiéndose en producto líquido; mientras que los no condensables, son enviados al erlenmeyer de 1000ml para medir su volumen.

Al finalizar el proceso, se pesa nuevamente los erlenmeyer de 250ml que contienen el producto líquido para determinar por diferencia de pesos la cantidad de líquido recolectado (Ilustración 17), y se mide el volumen de agua desalojado que representa la cantidad de gases no condensables producidos.

*Ilustración 17.- Erlenmeyer con fracción líquida obtenida*



*Fuente: Las autoras*

El producto líquido, es almacenado de acuerdo a las especificaciones presentadas por (INEN, 1984), en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 0930: Petróleo, Crudo y sus Derivados. Muestreo). Es decir que una vez que se obtienen las muestras, éstas son colocadas en envases de vidrio herméticamente cerrados que contienen la respectiva etiqueta del producto (Ilustración 18).

*Ilustración 18.- Tubos con fracción líquida*



*Fuente: Las autoras*

Una vez enfriado el reactor, se procede a retirar la cápsula de porcelana y pesar el residuo sólido (char) contenido en la misma (Ilustración 19), de igual manera que en los productos líquidos, se obtiene la cantidad de residuo generado mediante diferencia de pesos.

*Ilustración 19.- Residuo sólido en cápsula de porcelana*



*Fuente: Las autoras*

Con estas especificaciones se procede a realizar las siguientes pruebas:

- **PROCESO DE PIRÓLISIS A TEMPERATURAS MENORES DE 300°C**

Las pruebas se efectúan a 220°C de temperatura, tiempos de residencia de 10, 15, 20 y 30 minutos, a 9psi de presión, y 15g de polietileno de alta densidad para determinar si la temperatura de trabajo es la adecuada.

- **DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE UN CATALIZADOR EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS**

Se trabaja con 15g de polietileno de alta densidad, a 420°C de temperatura, presión de 9psi y un tiempo de residencia de 20 minutos. Y como catalizador se utiliza la zeolita, con la finalidad de determinar si el uso del catalizador mejora la eficiencia de obtención de la fracción líquida, esta se mezcla en la cápsula de porcelana con el residuo plástico.

Previo al uso del catalizador (Ilustración 20), es necesario que este pase por un proceso de secado debido a que posee 9.87% de humedad (Ilustración 21), para lo cual se utiliza una mufla a 150°C durante 3 horas (Ilustración 22); inmediatamente es almacenado en un recipiente hermético para evitar su contaminación y absorción de humedad (Ilustración 23).

*Ilustración 20.- Catalizador Zeolita*



*Fuente: Las autoras*



*Ilustración 21.- Analizador de humedad*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 22.- Mufla*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 23.- Recipiente hermético contenedor de zeolita*



*Fuente: Las autoras*

- **PRUEBAS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RESIDENCIA MÁS ÓPTIMO**

En base a los experimentos realizados por Proaño y Crespo, se toma como variable el tiempo de residencia estableciéndose el mismo en 30, 60 y 120 minutos, a una temperatura de 400°C, con Polietileno de Alta Densidad y presión constante (9psi).

### **3.6. VALORACIÓN DE LA PIRÓLISIS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS**

Para la ejecución de las pruebas se utiliza como variable tres tipos de plástico: polietileno de alta densidad, polietilentereftalato y poliestireno; trabajando a una temperatura de 400°C, tiempo de residencia de 30 minutos (determinado en la prueba anterior) y a presión constante de 9psi.

De acuerdo a los datos obtenidos, se señala el tipo de plástico que produce mayor fracción líquida

#### **3.6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ENSAYOS**

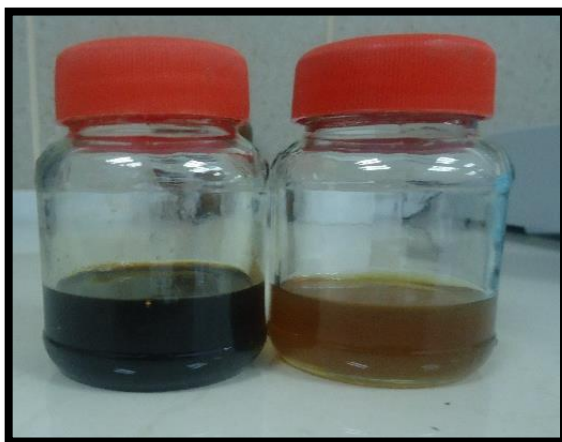
Los resultados obtenidos son analizados mediante un diseño completamente al azar a través de la técnica ANOVA en el software Minitab, para determinar si existe diferencia significativa entre las cantidades de fracción líquida de las muestras, de ser así, se continúa el análisis con la técnica Tukey para establecer el valor máximo entre muestras.

### **3.7. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA DE PIRÓLISIS**

De las fracciones líquidas resultantes de la pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Poliestireno (PS) (Ilustración 24), se procede a realizar las siguientes pruebas

físicas: Color y Olor, Densidad, Viscosidad, Punto de Inflamación y Punto de Congelación. Dichas pruebas no se pueden realizar con Polietilentereftalato (PET), debido a que la cantidad de fracción líquida generada en el proceso es mínima, obteniendo una mayor producción de fracción sólida (Ilustración 25).

*Ilustración 24.- Producto líquido de PS y PEAD*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 25.- Producto líquido y residuo carbonoso de PET*



*Fuente: Las autoras*

### 3.7.1. COLOR Y OLOR

Estas pruebas se basan en la percepción del observador, es decir, a través del sentido de la vista y el olfato.

### 3.7.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad del producto líquido de Polietileno de Alta Densidad y Poliestireno, se toma como base 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” de donde se extraen las siguientes definiciones:

- **Densidad:** Es el peso en vacío (la masa) de un volumen unitario de material, a una temperatura dada.
  
- **Densidad Relativa:** Es la relación entre la masa (peso en el vacío) de un volumen dado de material, a una temperatura  $T_1$ , y la masa de un volumen igual de agua, a una temperatura de referencia  $T_2$ . Cuando la temperatura de referencia es igual a  $4^{\circ}\text{C}$  y la temperatura a la que la densidad relativa del agua es igual a la unidad, la densidad relativa y la densidad son numéricamente iguales.

#### Equipos y Materiales

- Picnómetro de 5 ml
- Baño a temperatura constante,  $30^{\circ}\text{C}$
- Termómetro y termocupla
- Equipo de limpieza con disolvente
- Balanza analítica, con sensibilidad de 0,1 mg
- Vaso de precipitación
- Calentador con agitador magnético – Mechero

## Procedimiento

Primero se necesita conocer la densidad del agua a 30°C, para ello se procede a pesar el picnómetro vacío completamente libre de impurezas, conociendo el volumen del mismo (5ml); otro dato es el peso del picnómetro con agua destilada. Este dato servirá además para determinar la densidad de las muestras.

Entonces, con el picnómetro completamente limpio y seco, se lo llena con agua destilada y se introduce en un baño a temperatura constante de 30°C, se enrasa la muestra a la marca de volumen e inmediatamente se pesa. Este proceso se repite por tres ocasiones para obtener resultados más reales.

De igual forma se hace con las muestras tanto de Polietileno de Alta Densidad como de Poliestireno; luego de verificar que el picnómetro se encuentre libre de impurezas, se coloca la muestra de PEAD primero, luego la de PS, y se someten al baño hasta que alcancen los 30°C, se enrasa y se pesa, haciendo 3 repeticiones.

Entonces tenemos:

- Peso del picnómetro vacío
- Peso del agua en el picnómetro, a 30°C
- Densidad del agua, a 30°C
- Peso de la muestra contenida en el picnómetro (Ilustración 28 y 29)

Para determinar la densidad del agua a 30°C (Ilustración 26), se necesita el peso del picnómetro vacío, el peso con agua y su volumen (Ilustración 27), aplicando la fórmula general de la densidad masa sobre volumen.

$$dw = \frac{Pw - Pv}{V}$$

En donde:

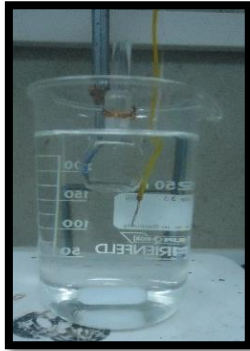
*dw: densidad del agua, g/ml*

*Pv: peso del picnómetro vacío, g*

*Pw: peso del picnómetro con agua, g*

*V: volumen, ml*

*Ilustración 26.- Baño a 30°C*



*Ilustración 27.- Peso del picnómetro con agua*



La densidad de la muestra es:

$$dm = \frac{Pm * dw}{Pw}$$

En donde:

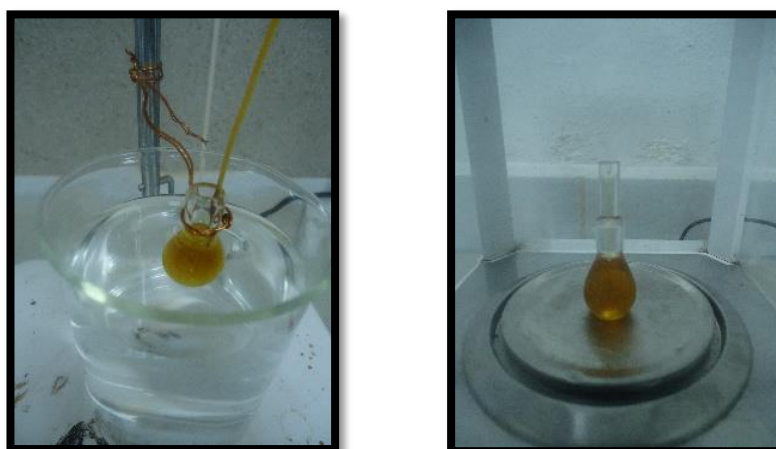
*dm: densidad de la muestra, g/ml*

*Pm: peso del picnómetro con la muestra, g*

*dw: densidad del agua, g/ml*

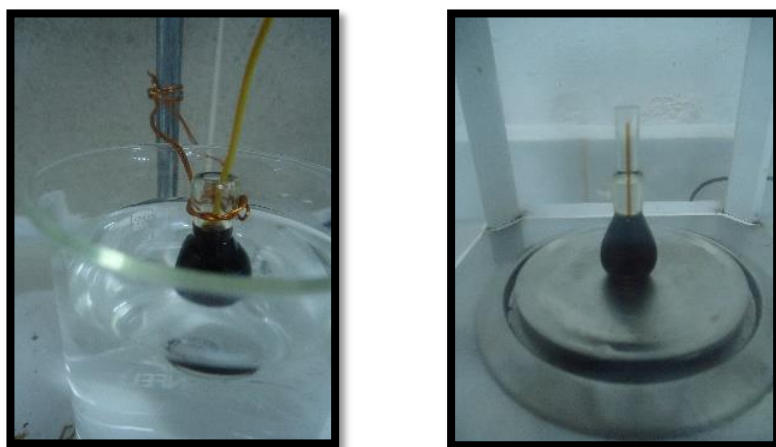
*Pw: peso del picnómetro con agua, g*

*Ilustración 28.- Proceso para determinar el peso del PEAD*



*Fuente: Las autoras*

*Ilustración 29.- Proceso para determinar el peso del PS*



*Fuente: Las autoras*

La densidad se toma como un indicador de la calidad del crudo, ya que proporciona información sobre el rendimiento de productos ligeros que se pueda obtener en su fraccionamiento (Rojas Gutiérrez, 2009). En la industria del petróleo, se utiliza la densidad API (grados de un densímetro), estandarizado por el American Petroleum Institute (Cordero López, 2003).

La densidad API es una escala arbitraria relacionada con la densidad relativa del petróleo y determinada a 15,6/15,6°C (60/60°F), definida por la siguiente ecuación (INEN, 2001):

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{GE (15^{\circ}C)} - 131,5$$

En donde:

$^{\circ}API$ : Densidad API

$GE(15^{\circ}C)$ : Gravedad específica o Densidad relativa, adimensional

El primer paso es corregir la temperatura de ensayo, 30°C, a la temperatura de referencia 15°C, mediante la siguiente fórmula (Chiaravalotti, Ravera, & Laidi, 2008):

$$D (15^{\circ}C) = D (t_e) + b (t_e + 15^{\circ}C)$$

En donde:

$D (15^{\circ}C)$ : Densidad de la muestra a la temperatura de referencia, g/ml

$D (t_e)$ : Densidad de la muestra a la temperatura de ensayo, g/ml

$b$ : Factor de corrección

$t_e$ : Temperatura de ensayo, °C

El factor de corrección (b) está en base a la densidad obtenida de la muestra a 30°C, y se obtiene de la Tabla 5.



Tabla 5.- Factor de corrección (b)

<i>Rangos de D ( t<sub>c</sub> )</i>	<i>b</i>	<i>Rangos de D ( t<sub>c</sub> )</i>	<i>b</i>
0,680 – 0,689	0,00088	0,800 – 0,809	0,00070
0,690 – 0,699	0,00086	0,810 – 0,819	0,00069
0,700 – 0,709	0,00085	0,820 – 0,829	0,00068
0,710 – 0,719	0,00084	0,830 – 0,839	0,00067
0,720 – 0,729	0,00083	0,840 – 0,849	0,00066
0,730 – 0,739	0,00081	0,850 – 0,859	0,00066
0,740 – 0,749	0,00080	0,860 – 0,869	0,00066
0,750 – 0,759	0,00078	0,870 – 0,879	0,00065
0,760 – 0,769	0,00076	0,880 – 0,889	0,00065
0,770 – 0,779	0,00075	0,890 – 0,899	0,00064
0,780 – 0,789	0,00073	0,900 – 0,909	0,00063
0,790 – 0,799	0,00072	0,910 – 0,919	0,000625

Fuente: (Chiaravalotti, Ravera, & Laidi, 2008)

Luego, para poder aplicar esta fórmula, se debe obtener la densidad relativa o también denominada gravedad específica.

$$GE = \frac{D(15^{\circ}C)}{Dw(15^{\circ}C)}$$

En donde:

*D (15 °C): Densidad de la muestra a 15°C, g/ml*

*Dw (15°C): Densidad del agua a 15°C, g/ml*

Además que mediante la densidad API se puede determinar la volatilidad de un combustible.

### 3.7.3. VISCOSIDAD

Para determinar la viscosidad del producto líquido resultado de la pirólisis de residuos plásticos Polietileno de Alta Densidad y el Poliestireno, se usa como base la NTE INEN 810:1986 “Productos de Petróleo. Determinación de la Viscosidad Cinemática y Dinámica en Líquidos Transparentes y Opacos” en donde se encuentra la siguiente terminología:

- **Viscosidad cinemática.** Es la relación entre la viscosidad y la densidad de la muestra; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo la acción de la gravedad. En el SI, la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo.
  
- **Viscosidad dinámica (coeficiente de).** Es la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y el coeficiente de corte; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido. En el SI, la unidad de viscosidad dinámica es el pascal por segundo.

#### Equipos y Materiales

- Viscosímetro de Oswald
- Termómetro – Termocupla
- Erlenmeyer de 1000ml
- Calentador con agitador magnético – Mechero
- Pipeta de 10ml
- Soporte universal
- Pinzas para soporte universal
- Dispositivo para medir el tiempo
- Pera

## **Procedimiento**

Antes de iniciar las pruebas se debe constatar que el viscosímetro se encuentre completamente limpio y seco; luego se inicia la prueba número uno, se toma con la pipeta 10 ml de muestra (agua destilada) y se coloca en el viscosímetro, este a su vez se somete a un baño a temperatura constante de 30°C, mediante la acción de la pera se hace llegar el líquido hasta la marca, finalmente se determina el tiempo en segundos que demora el volumen fijo del agua en fluir bajo la acción de la gravedad, a través del tubo capilar del viscosímetro, se realizan 3 repeticiones. Esta prueba se la realiza con la finalidad de obtener la constante de calibración del instrumento, ya que la misma se puede calcular cuando se tenga la viscosidad estándar de un líquido, en este caso el agua.

Siguiendo el mismo protocolo, se procede a tomar el tiempo en segundos que tarda el volumen fijo del PEAD primero, y luego del PS, en fluir a través del viscosímetro, sometidos a un baño de temperatura controlada (30°C), finalmente este tiempo multiplicado por la constante de calibración dará la viscosidad de cada muestra, se realiza tres repeticiones tanto para el Polietileno de Alta Densidad como para el Poliestireno.

De esta manera se tiene los siguientes datos:

- Tiempo que tarda el agua en fluir a través del viscosímetro
  
- Constante de calibración del viscosímetro

La ecuación para el cálculo de la constante de calibración se obtiene de (Chiaravalotti, Ravera, & Laidi, 2008):

$$C = \frac{V_{cw}}{t_w}$$

En donde:

*C*: constante de calibración del viscosímetro, cSt/s

*V<sub>cw</sub>*: Viscosidad cinemática del agua, cSt

*t<sub>w</sub>*: tiempo que tarda el agua en fluir a través del viscosímetro, s

➤ Viscosidad cinemática del agua a 30°C

La viscosidad cinemática se calcula dividiendo la viscosidad dinámica del agua para su densidad (NTE INEN 810:1986):

$$V_{cw} = \frac{V_d}{d_w}$$

En donde:

*V<sub>cw</sub>*: viscosidad cinemática del agua, m<sup>2</sup>/s

*V<sub>d</sub>*: Viscosidad dinámica del agua, N.s/m<sup>2</sup>

*d<sub>w</sub>*: densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>

➤ Tiempo que tarda la muestra en fluir a través del viscosímetro (Ilustración 30).

La viscosidad cinemática de la muestra es:

$$V_{cm} = C * t_m$$

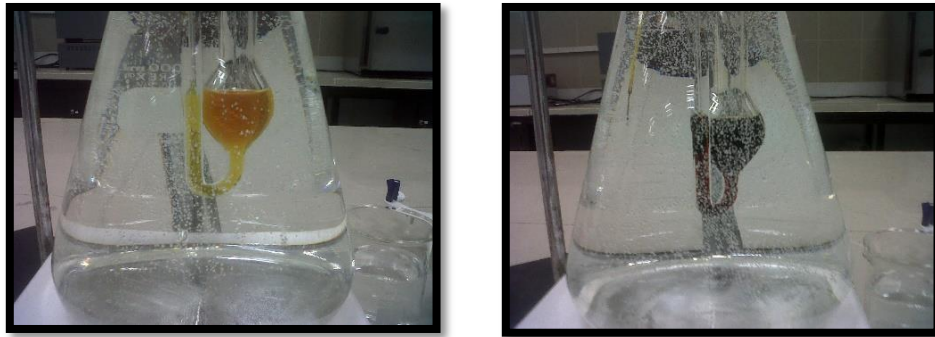
En donde:

*V<sub>c</sub>: Viscosidad cinemática, cSt*

*C: constante de calibración, cSt/s*

*T<sub>m</sub>: tiempo que tarda la muestra en fluir a través del viscosímetro, s*

*Ilustración 30.- Tiempo que tarda el PEAD y PS en fluir a través del viscosímetro*



*Fuente: Las autoras*

### **3.7.4. PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Para conocer el punto de inflamación de los productos líquidos de la pirólisis de residuos plásticos, se usa como base la NTE INEN 808:1986 “Productos de Petróleo. Determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto Cleveland”.

#### **Equipos y Materiales**

- Cápsula de porcelana de 5 ml
- Termómetro-Termocupla
- Pipeta de 1 ml
- Fosforera
- Alcohol
- Algodón
- Palillo largo
- Mechero bunsen

## Procedimiento

Debido a que no se contaba con el vaso abierto Cleveland, se lo sustituyó con una cápsula de porcelana, con esta completamente limpia y seca se procede a realizar la prueba.

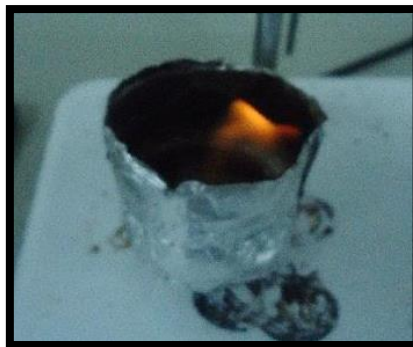
Primero se coloca 1 ml de muestra de PEAD en la cápsula de porcelana, con el mechero se va calentando al principio rápidamente y luego al acercarse al punto de inflamación con un aumento de temperatura lento y constante, midiendo la temperatura de forma constante, pasando una llama por encima de la cápsula hasta que los vapores emitidos por la muestra se enciendan, tomando la temperatura a la cual aparece la primera llama, se realizan 3 repeticiones.

Lo mismo sucede con la muestra de PS, se toma 1ml de muestra que se calienta, y se toma la temperatura a la cual los gases del líquido se encienden por primera vez.

Luego de este proceso se obtiene lo siguiente:

- Temperatura a la cual los gases de PEAD se inflaman

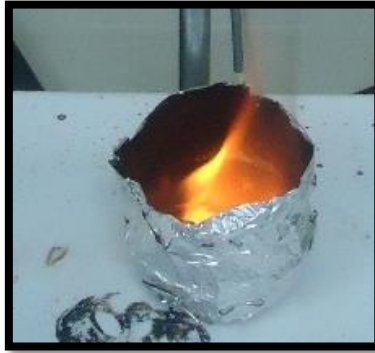
*Ilustración 31.- Análisis del Punto de Inflamación del PEAD*



*Fuente: Las autoras*

- Temperatura a la cual los gases de PS se inflaman

*Ilustración 32.- Análisis del Punto de Inflamación del PS*



*Fuente: Las autoras*

### **3.7.5. PUNTO DE CONGELACIÓN**

Para determinar el punto de congelación de los productos líquidos de los residuos plásticos, se utiliza el procedimiento determinado en las normas internacionales ASTM (American Society for Testing and Materials), D 2386-06 “Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels”; esta norma es para combustibles de aviación, sin embargo el método es aplicable a este proyecto, dentro de la cual se ha tomado el siguiente texto:

- **Punto de congelación en los combustibles de aviación**, es la temperatura del combustible en el que los cristales de hidrocarburos sólidos, formados en el enfriamiento, desaparecen cuando se deja subir la temperatura del combustible bajo condiciones específicas de la prueba.

- **Importancia y Uso:** El punto de congelación de un combustible de aviación es la temperatura más baja a la que el combustible permanece libre de cristales de hidrocarburos sólidos que pueden restringir el flujo de combustible a través de filtros si están presentes en el sistema de combustible de la aeronave.

### **Equipos y materiales**

- Congelador (refrigeradora)
- Matraz de 50ml
- Pipeta
- Termómetro
- Agitador de vidrio
- Corcho de seguridad para el tubo

### **Procedimiento**

Se toma 15 ml de muestra de PEAD y se coloca en el matraz, seguidamente se tapa con el corcho que contiene el termómetro y el agitador, luego esta muestra se coloca en el congelador, hasta que se solidifique completamente, se saca de la refrigeradora y se toma la temperatura a la cual desaparecen los últimos cristales, se realizan 3 repeticiones. El mismo procedimiento se sigue con el PS.

Obteniendo los siguientes datos:

- Temperatura a la cual se congela el PEAD
- Temperatura a la cual se congela el PS

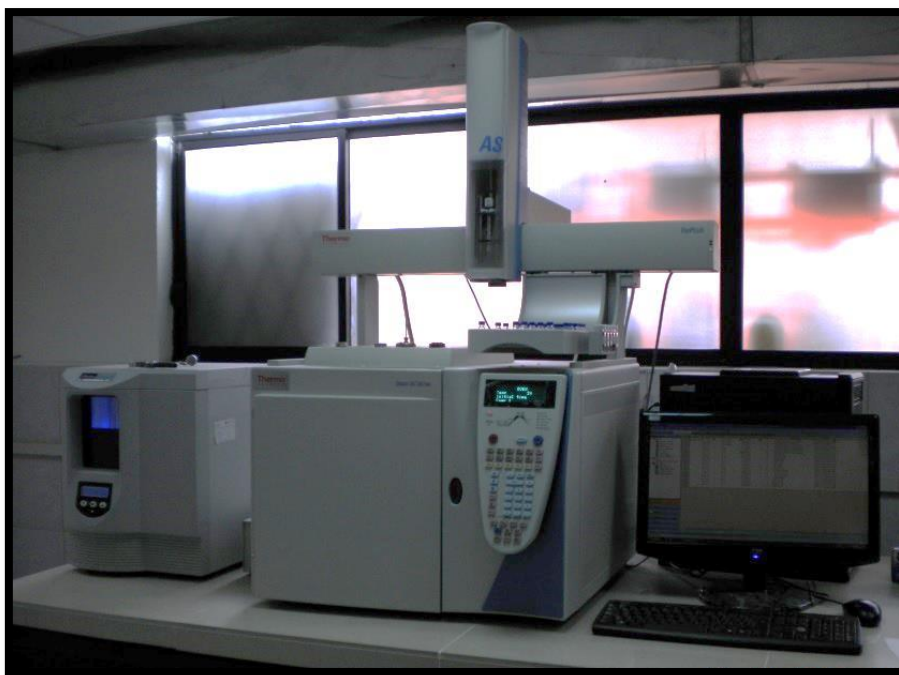


### 3.8. DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES QUE CONTIENEN LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS

En el cromatógrafo (Ilustración 33), se utiliza un estándar que contiene los siguientes componentes: 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

Adicionalmente como solvente se trabaja con Acetonitrilo (100ml), con un detector tipo GC/ FID, una columna DB-5,30m, un diametro 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.

*Ilustración 33.- Cromatógrafo de Gases*



*Fuente: Las autoras*

### **3.8.1. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE MUESTRAS**

Se realiza la destilación de la fracción líquida tanto del Polietileno de Alta Densidad como del Poliestireno para separar las distintas fracciones que serán analizadas posteriormente en el cromatógrafo de gases. El proceso de destilación de hidrocarburos utilizado se rige en la NTE INEN 926:1982 “Productos de Petróleo. Ensayos de Destilación”.

#### **Equipos y materiales**

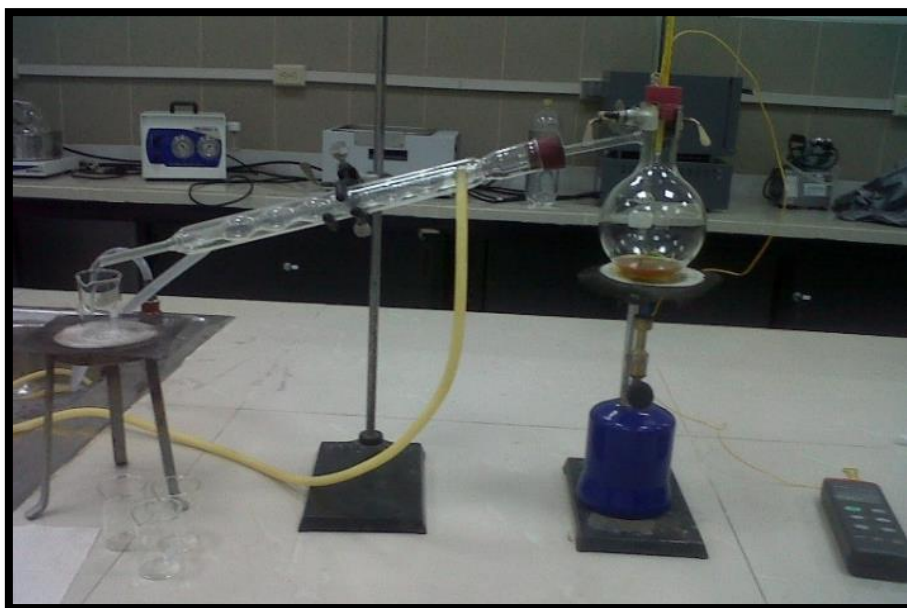
- Balón de destilación de 500ml
- Condensador
- Vaso de precipitación
- Pipeta de
- Mechero
- Termómetro – Termocupla
- Pinzas
- Soporte universal
- Trípode
- Anillo
- Mallas

#### **Procedimiento**

El proceso de destilación inicia con el armado del equipo (Ilustración 34), una vez que todo está listo se coloca 15ml de muestra de PEAD en el balón de destilación, dentro de este se pone pequeños trozos de vidrio para evitar que la muestra salpique y se desperdicie. Se enciende el mechero, se deja correr el agua. Durante el proceso se dan

variaciones de temperatura, debido al fraccionamiento de las moléculas, por lo que se toma por separado el destilado de acuerdo al rango de temperatura.

*Ilustración 34.- Sistema de destilación*



*Fuente: Las autoras*

Para iniciar los análisis en el cromatógrafo de gases, se procede a diluir las muestras de las diferentes fracciones obtenidas durante la destilación, para disminuir su concentración. La dilución se realiza con acetonitrilo, en proporción 1:1, por lo tanto se mezclan 500ul de acetonitrilo con 500ul de muestra.

Previo a la corrida en el cromatógrafo, se preparan 5 viales: un vial de acetonitrilo cuya función es limpiar la columna, y en los 4 respectivos viales las fracciones obtenidas de los líquidos pirolíticos.

Las soluciones preparadas son colocadas en el cromatógrafo de gases para determinar su composición.

*Ilustración 35.- Viales a ser analizados*



*Fuente: Las autoras*

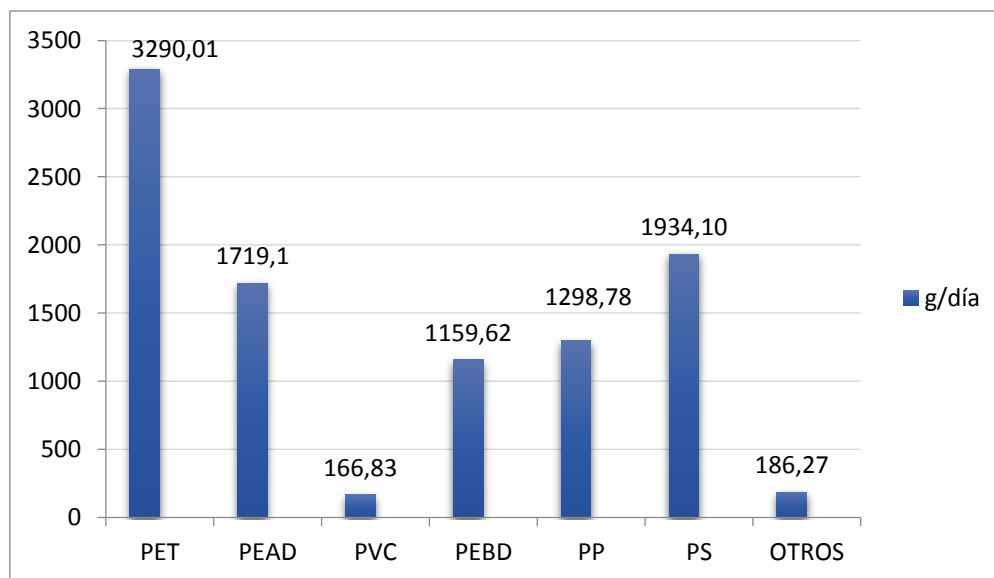
# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Como se muestra en el Gráfico 2, el residuo plástico de mayor producción es el PET con 3290.016g/día y el de menor generación es el PVC con 166.83g/día. Para el desarrollo de esta investigación se usan los tres tipos de residuos plásticos que se generan en mayor cantidad, siendo estos: PET (botellas de bebidas), PEAD (contenedores de aceite de cocina) y PS (envases de yogurt) (Ver Anexo 1).

*Gráfico 2.- Producción diaria de residuos plásticos dentro de la Universidad Politécnica Salesiana*



*Fuente: Las autoras*

## 4.2.PROCESO DE PIRÓLISIS A TEMPERATURAS MENORES DE 300°C

De los cuatro ensayos realizados, según se muestra en la Tabla 6 se obtiene un rendimiento máximo de 25,60% en un tiempo de permanencia de 30 minutos, y mínimo de 9,13% en 15 minutos.

*Tabla 6.- Ensayos con temperaturas menores a 300°C*

<b>Ensayo</b>	<b>TIEMPO DE PERMANENCIA (min)</b>	<b>FRACCIÓN LÍQUIDA (g)</b>	<b>RESIDUO (g)</b>	<b>% RENDIMIENTO</b>
Ensayo 1	10	1,95	5,33	13,00
Ensayo 2	15	1,37	5,27	9,13
Ensayo 3	20	2,99	4,67	19,93
Ensayo 4	30	3,84	3,1	25,60

*Fuente: Las autoras*

En estos ensayos, después de realizado el proceso de pirólisis, se encuentra una acumulación de aceites en la cápsula de porcelana que representa la cantidad de residuo plástico que no ha sido pirolizado totalmente (Ilustración 36) , coincidiendo con lo citado por Proaño y Crespo, que a temperaturas menores a 300°C, se obtiene un producto sólido resinoso, es decir, el plástico ingresado se funde en el interior del reactor; por lo que, un proceso de pirólisis de residuos plásticos no debe realizarse a temperaturas menores a 300°C.

*Ilustración 36.- Residuo resinoso acumulado en cápsula de porcelana*



*Fuente: Las autoras*

### **4.3.PROCESO DE PIRÓLISIS CON CATALIZADOR**

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 7 el rendimiento máximo de fracción líquida es de 57.5% alcanzado en las pruebas sin catalizador y el mínimo de 7% en las pruebas con catalizador, obteniendo un promedio de rendimiento de 13.14% en las pruebas con catalizador y de 47.86% sin catalizador (para mayor detalle ver Anexo 2).

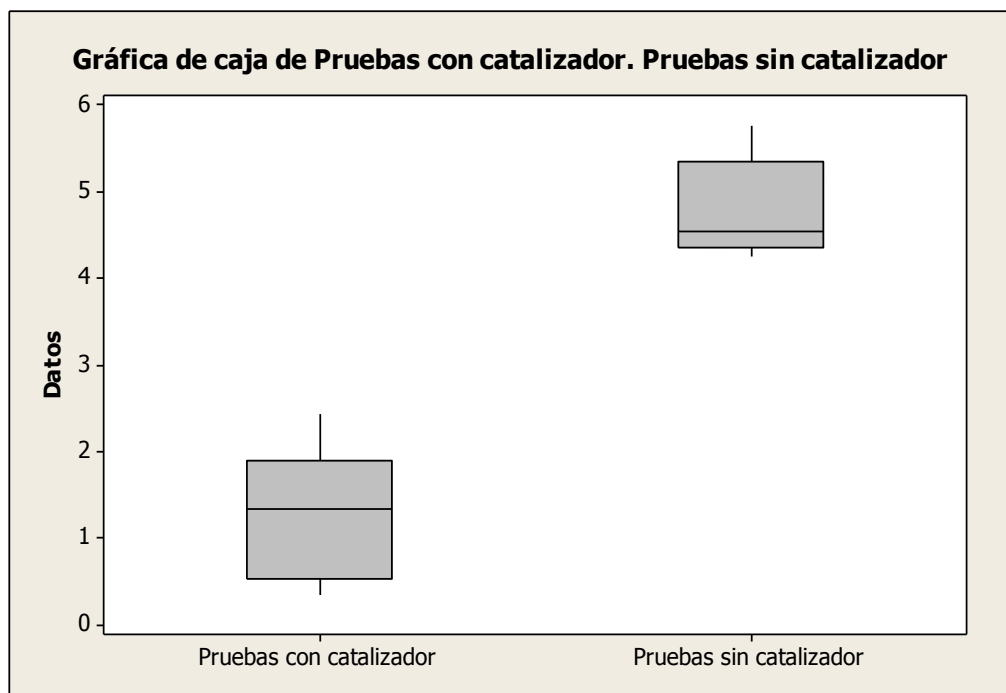
*Tabla 7.- Comparación de pruebas con y sin catalizador zeolita*

	<b>Pruebas con catalizador</b>	<b>Pruebas sin catalizador</b>
<b>Rendimiento</b>	7%	57,5%
	7,3%	44,5%
	13,4%	49,4%
	13,7%	42,5%
	24,3%	45,4%
<b>Promedio</b>	13,14%	47,86%

*Fuente: Las autoras*

Como resultado de los análisis con ANOVA (Anexo 3) de estos ensayos tenemos que el valor de  $p$  fue menor a 0.05, rechazándose la hipótesis nula, lo cual determina que existe una diferencia significativa entre los experimentos llevados a cabo con y sin catalizador, como se demuestra en el Gráfico 3 que no existe un traslape entre cajas, siendo la cantidad de líquido mayor cuando no se trabaja con catalizador.

*Gráfico 3.- Gráfico de cajas de pruebas con y sin catalizador*

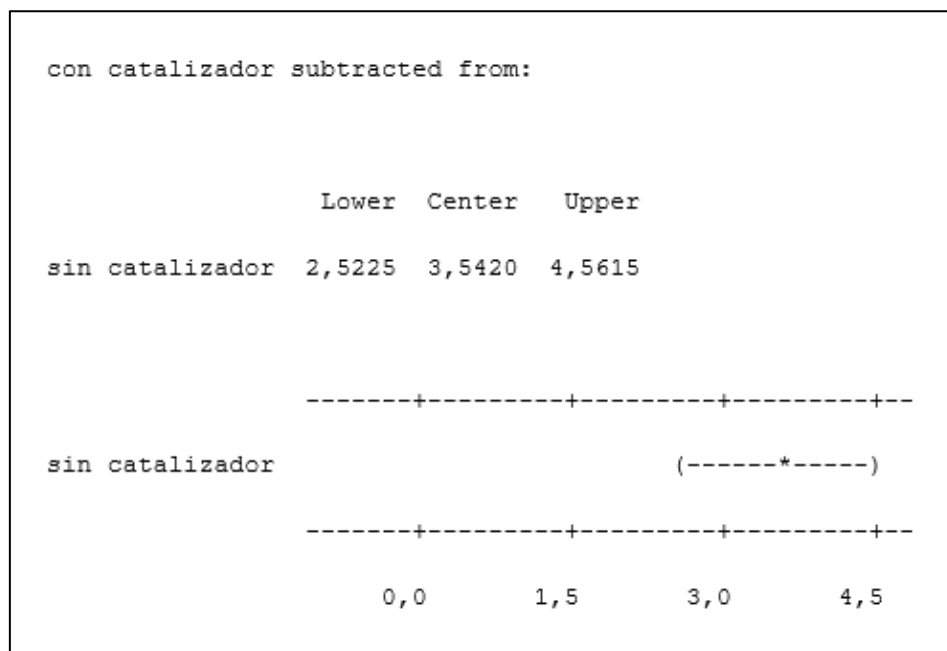


*Fuente: Las autoras*

En el Gráfico 4 se observa el análisis de Tukey, determinando que las pruebas sin zeolita son de mayor eficiencia, por lo tanto, en pruebas posteriores dicho catalizador no será utilizado.



*Gráfico 4.- Análisis de Tukey de pruebas con y sin catalizador*

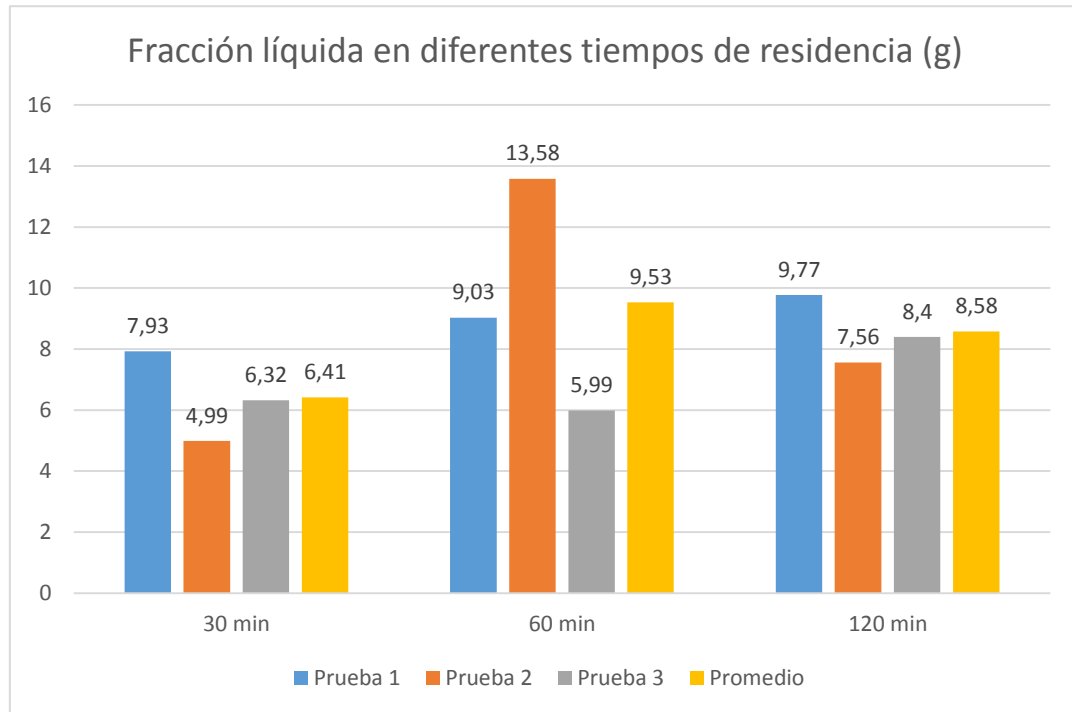


*Fuente: Las autoras*

#### **4.4. PRUEBAS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RESIDENCIA MÁS ÓPTIMO**

Como se observa en el Gráfico 5, la producción máxima de fracción líquida es de 13.58g obtenido en un tiempo de residencia de 60 minutos y la producción mínima en un tiempo 30 minutos es de 4.99g. En promedio se obtiene 6.41g de fracción líquida en un tiempo de residencia de 30 minutos; 28.6g en 60 minutos y 25.73g en 120 minutos (Ver Anexo 4 para mayor detalle).

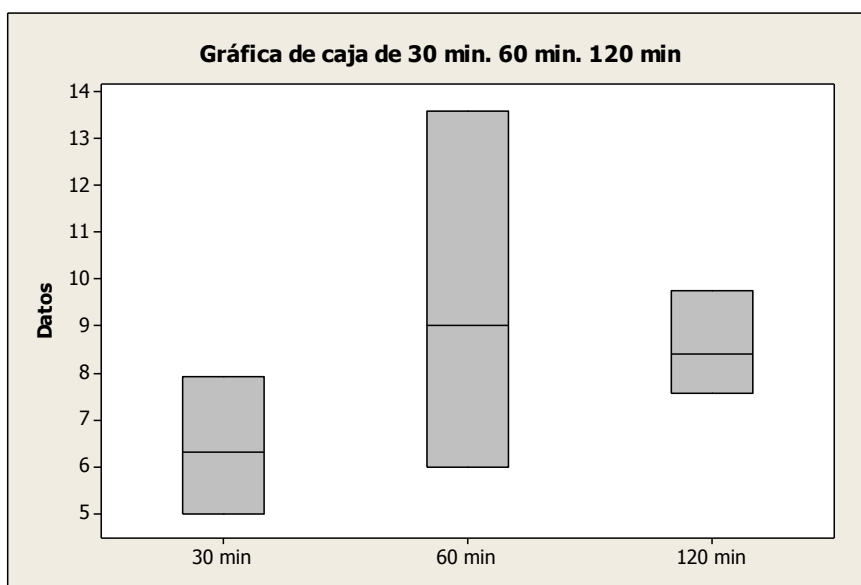
*Gráfico 5.- Fracción líquida en diferentes tiempos de residencia*



*Fuente: Las autoras*

Para estos ensayos, de acuerdo al análisis ANOVA (Anexo 5), el valor de p es mayor a 0.05, lo cual indica que se acepta la hipótesis nula, demostrando que no existe diferencia significativa entre ellos, lo mismo que se evidencia en el traslape de cajas mostrado en el Gráfico 6.

Gráfico 6.- Gráfico de cajas de ensayos a 30, 60 y 120 minutos



Fuente: Las autoras

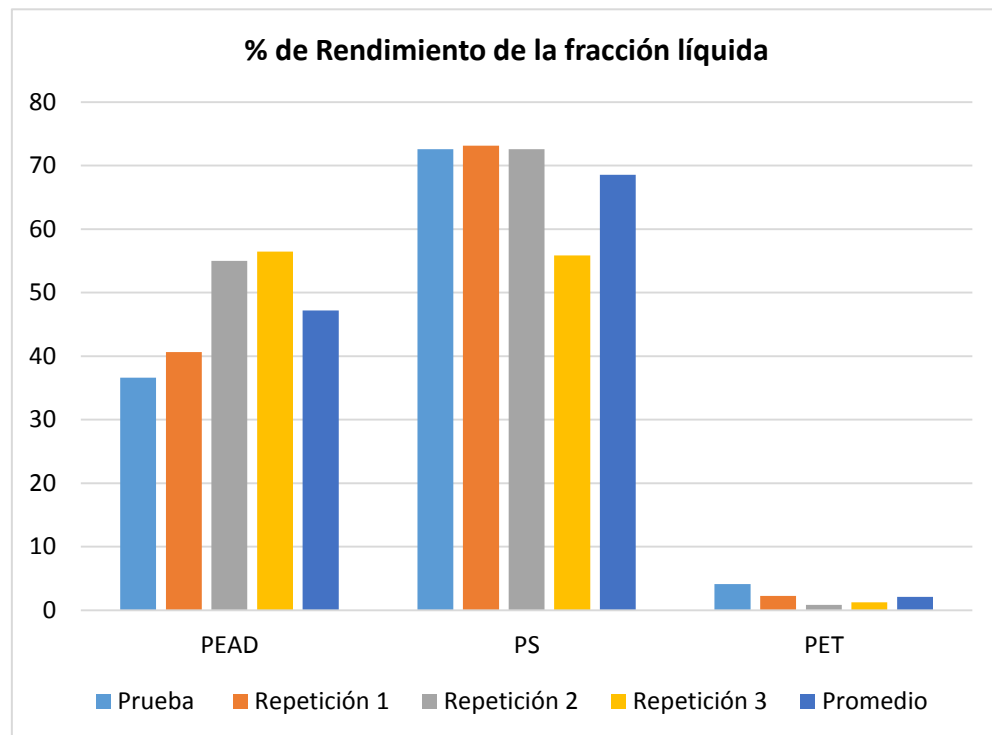
En los ensayos realizados por Proaño y Crespo se recomienda tiempos de residencia de 60 y 120 minutos como los más óptimos, sin embargo, para este estudio se toma un tiempo de residencia de 30 minutos debido a que no existe una diferencia significativa de producción de fracción líquida en los diferentes 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.

#### **4.5. VALORACIÓN DE LA PIRÓLISIS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS**

En el Gráfico 7 se observa que el rendimiento máximo en la generación de fracción líquida es de 73.13% obtenido de la pirólisis de PS y el mínimo rendimiento es 0.87% de la pirólisis de PET. El rendimiento promedio de PS es 68.55% como el de mayor

porcentaje; seguido del PEAD con 47.18% y por último el PET con 2.13% (Ver Anexo 6 para mayor detalle).

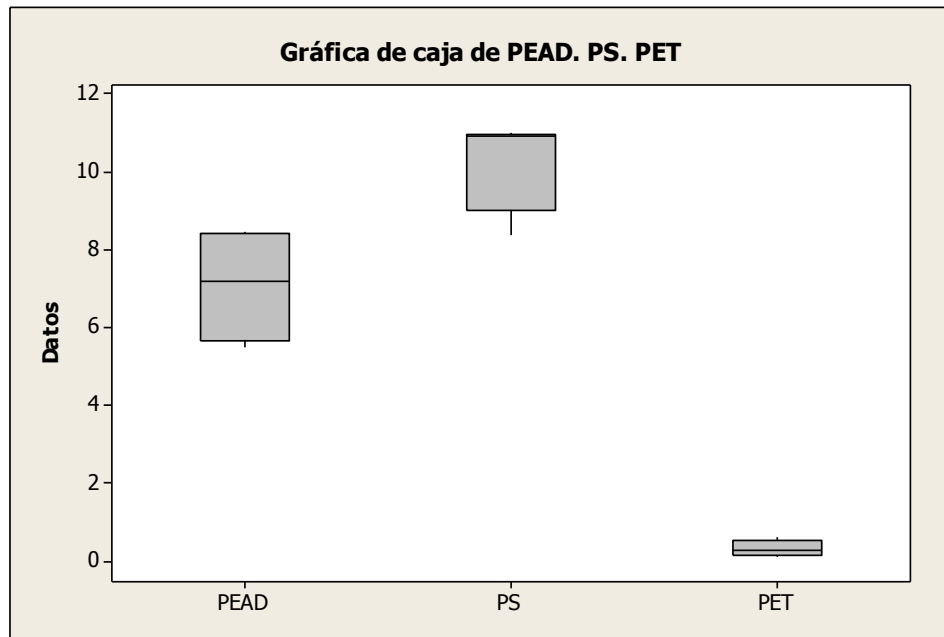
*Gráfico 7.- Rendimiento de los diferentes tipos de plástico con relación a la fracción líquida obtenida.*



*Fuente: Las autoras*

De acuerdo a los análisis ANOVA (Anexo 7) el valor p es menor a 0.05 lo cual indica que existe una diferencia significativa, esto determina que se rechaza la hipótesis nula, como se observa en el Gráfico 8 donde no existe un traslape entre las mismas.

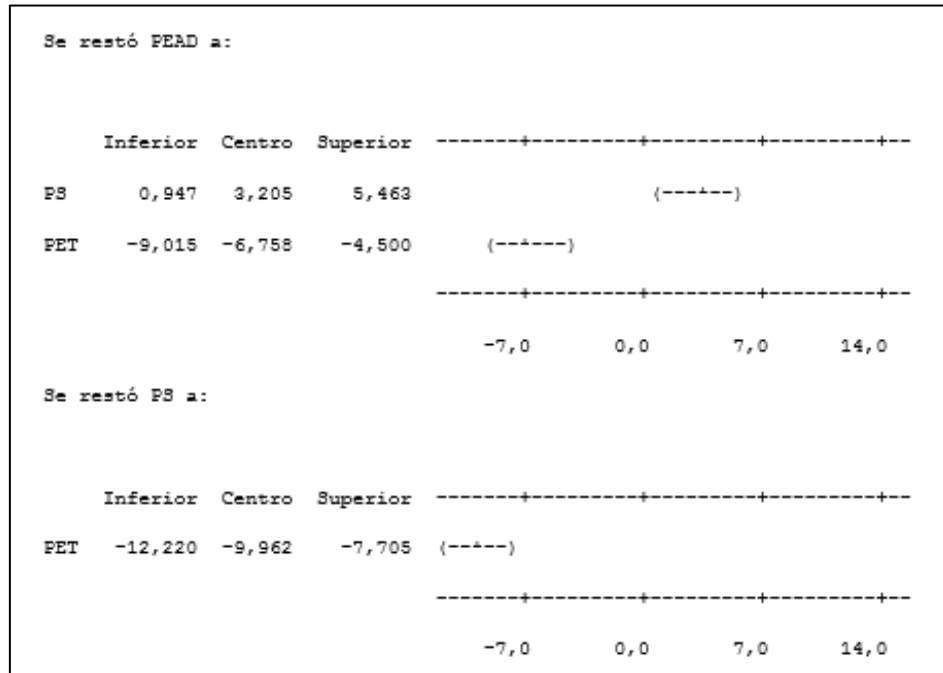
*Gráfico 8.- Ensayos con diferentes tipos de residuos plásticos*



*Fuente: Las autoras*

Mediante el análisis de Tukey presentado en el Gráfico 9, se evidencia que la cantidad de PEAD es mayor a la cantidad de fracción líquida de PET, y el PS es mayor tanto al PET como al PEAD, por lo tanto, el residuo plástico que mayor cantidad de fracción líquida genera es el PS.

*Gráfico 9.- Análisis de Tukey de PET, PEAD y PS*



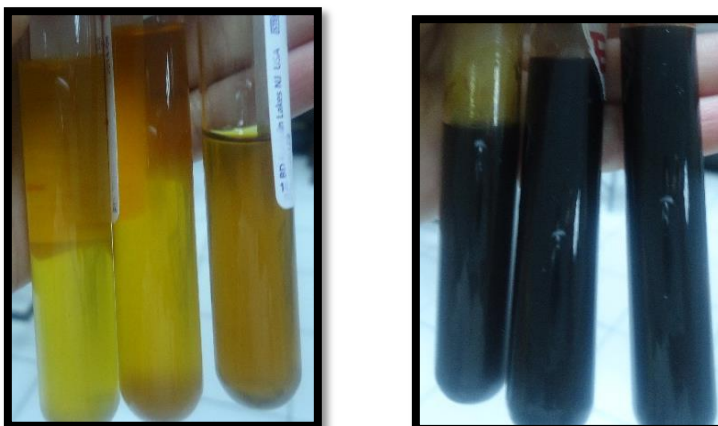
*Fuente: Las autoras*

## 4.6. ANÁLISIS FÍSICOS

### 4.6.1. COLOR Y OLOR

Como se evidencia en la Ilustración 39, la fracción líquida de polietileno de alta densidad (PEAD) presenta un color amarillo, mientras que el poliestireno es de color oscuro tendiente a negro, ambos desprenden un olor irritante característico de la gasolina, diésel u otros derivados del petróleo.

*Ilustración 37.- Fracción Líquida de PEAD y PS*

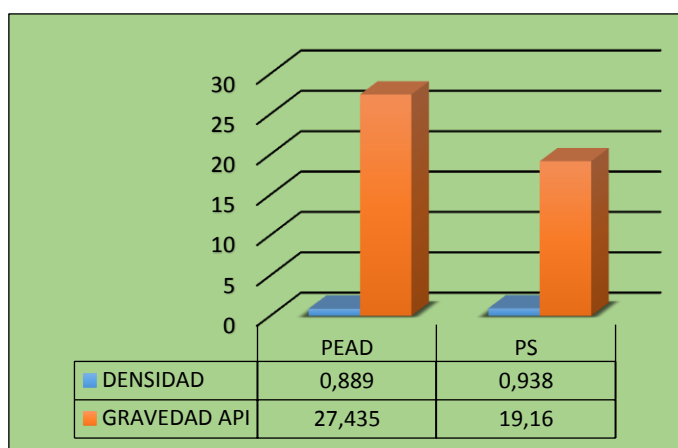


*Fuente: Las autoras*

#### **4.6.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD**

En el Gráfico 10 se presentan los valores de densidad y gravedad API de la fracción líquida de PEAD y PS. En el cual se puede observar que existe una diferencia de densidad, entre ellos, de tan solo 0.049 g/ml; mientras que, en la gravedad °API se marca una diferencia mayor ya que el PEAD tiene 27.435 °API y el PS 19.16 °API.

*Gráfico 10.- Densidad y Gravedad API del PEAD y PS*



*Fuente: Las autoras*

Como se mencionó en el capítulo anterior, 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 8 la fracción líquida de Polietileno de Alta Densidad al tener una gravedad API de 27.435, se ubica dentro de un crudo mediano; y el Poliestireno con una gravedad API de 19.160, se considera un crudo pesado.

*Tabla 8.- Tipo de hidrocarburo de acuerdo a la Gravedad API*

<b>Hidrocarburos</b>	<b>Gravedad °API</b>
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

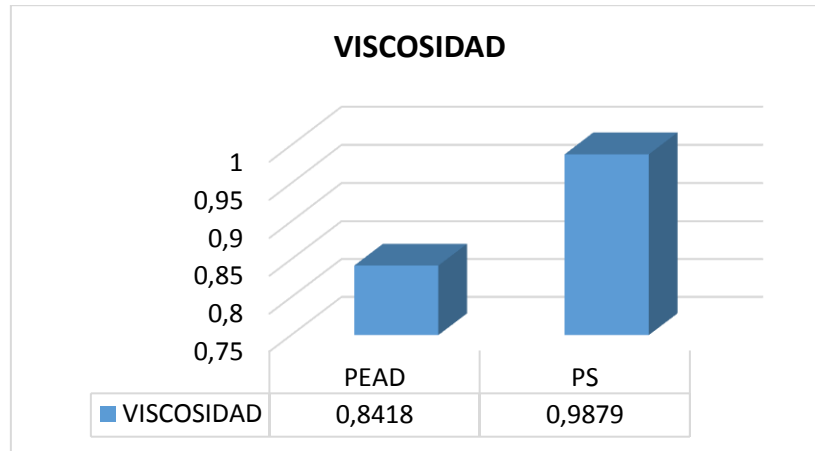
*Fuente: Las autoras*

### **4.6.3. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD**

La viscosidad aumenta cuando disminuye la densidad API, es decir, cuanto más pesado es un crudo mayor viscosidad presentará (Curtis & et al, s.f.). Y esto se evidencia claramente en los resultados obtenidos de la viscosidad (Gráfico 11), 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 (Miliarium, s.f.).



*Gráfico 11.- Viscosidad de la fracción líquida de PEAD y PS*



*Fuente: Las autoras*

#### **4.6.4. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN Y CONGELACIÓN**

Como se puede observar en la Tabla 9 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.

*Tabla 9.- Punto de Inflamación y Congelación de PEAD y PS*

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

*Fuente: Las autoras*

## 4.7. CROMATOGRAFIA DE GASES

De la destilación de PEAD y PS, se obtienen 3 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 10 en donde, el porcentaje de destilación del PS es mayor al del PEAD, quedando menor cantidad de fracción pesada de PS sin destilar. Es así que, se tienen 3.62 g de fracción pesada de PEAD de la cual se pueden obtener nuevas fracciones empleando temperaturas mayores, mientras que, del PS se tienen únicamente 1.85 g por aprovechar, de los cuales se obtendrá menor cantidad de destilado.

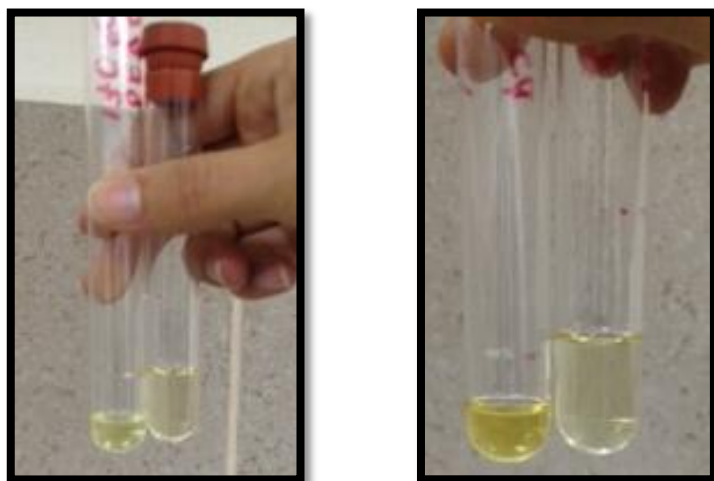
*Tabla 10.- Fracciones de Destilado de PEAD y PS*

	<b>FRACCIÓN 1</b>	<b>FRACCIÓN 2</b>	<b>FRACCIÓN 1 +2</b>	<b>% DE DESTILADO</b>	<b>FRACCIÓN 3</b>
<b>PEAD (ml)</b>	3.6	3.65	7.25	48.33	3.62
<b>PS (ml)</b>	6.54	3.08	9.62	64.13	1.85

*Fuente: Las autoras*

En las siguientes imágenes se pueden observar las fracciones de destilado de polietileno de alta densidad y de poliestireno (Ilustración 40).

*Ilustración 38.- Fracciones de destilación de PEAD y PS*



*Fuente: Las autoras*

Del análisis realizado en el cromatógrafo de gases se establece que, la muestra que presenta mayor cantidad de compuestos aromáticos es la obtenida por destilación a 165°C de poliestireno, seguida de la muestra a 170°C de polietileno de alta densidad, a continuación está la muestra a 140°C de poliestireno y por último la muestra de polietileno de alta densidad obtenida a 140°C, como se presenta en la Tabla 11.

*Tabla 11.- Sustancias contenidas en las fracciones de PS y PEAD*

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

Sustancia	Cantidad			
	PS a 140°C	PS a 165°C	PEAD a 140°C	PEAD a 170°C
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
Subtotal	12.637x2	49.815 x2	5.392 x2	15.001 x2
TOTAL	25.274	99.63	10.784	30.002

*Fuente: Las autoras*

El subtotal de los compuestos es multiplicado por 2, debido a que las fracciones que ingresaron al cromatógrafo, fueron diluidas previamente con acetonitrilo, en proporción 1:1.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

Con este estudio se determinó que los residuos plásticos de mayor generación dentro de la Universidad Politécnica Salesiana corresponden al Polietilentereftalato con un 33.72%, seguido por Poliestireno con un 19.82% y Polietileno de Alta Densidad con un 17.62%.

Todas las pruebas realizadas sirvieron para validar el funcionamiento del prototipo de pirólisis con el que cuenta la Universidad Politécnica Salesiana.

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.

Si bien en algunos trabajos de investigación se recomienda el uso de zeolita como catalizador para la aceleración de la descomposición de los residuos plásticos, en este trabajo se demostró estadísticamente que su uso no favorece a la obtención de mayor cantidad de fracción líquida; por el contrario, la disminuye.

Posterior a los ensayos se concluye que los tiempos de residencia (30, 60, 120 minutos) 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 usadas en procesos secundarios, como se demuestra en este estudio la fracción líquida puede emplearse para la producción de energía.

El Poliestireno 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 determina que el Polietilentereftalato, 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 es un crudo mediano, mientras que la del Poliestireno 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.

## **5.2.RECOMENDACIONES**

Exhortamos a continuar los trabajos sobre la presente línea de investigación, mediante la variación de parámetros, tales como: tipos de residuos, temperatura y presión.

Recomendamos realizar estudios de aprovechamiento de las fracciones sólida y gaseosa, provenientes del proceso de pirólisis.

Se debería buscar maneras para minimizar el impacto generado por los gases de pirólisis, pudiendo ser aprovechados como fuente de energía.

Para obtener mayor información de las fracciones del proceso de pirólisis, se recomienda la implementación de equipos de análisis de combustibles.

## BIBLIOGRAFÍA

- Lee, K.-H., & Cheon Oh, S. (2009). Kinetics of the thermal degradation of wax materials obtained from pyrolysis of mixed waste plastics. Cheonan.
- ACRR et al. (2004). Para el reciclaje de los residuos plásticos una guía por y para las autoridades locales y regionales. Europa: Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje (ACRR).
- Almazán , M. (2006). Carbones activos a partir de residuos de politereftalato de etileno (PET). Granada: Editorial de la Universidad de Granada.
- Almeida Gamarra, N. (2006). Ensayos preliminares de pirólisis de residuos sólidos municipales para obtención de biocombustibles. Bogotá.
- Alonso Morales, M. N. (2008). Obtención de Sólidos Carbonosos mediante Pirólisis de Polietileno de Baja Densidad. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Alvarado Franco, M. (2005). Caracterización en frío de un reactor solar de lecho fluidizado para la pirolisis de la Biomasa. Mexico, D.F.
- Aracil Sáez, 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.
- Arandes, J. M., Bilbao, J., & López Vale, D. (2004). RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS. Revista Iberoamericana de Polímeros.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). Tecnología de Polímeros. Alicante: Universidad de Alicante.
- Berenguer Muñoz, D. (2008). Craqueo Catalítico de Polímeros; Estudio de Diferentes Sistemas Polímero/Catalizador. Alicante: Universidad de Alicante.
- Botello, F., Avalos, F., & Camporredondo, E. (2010). Pirólisis del polietileno en presencia y ausencia de catalizadores arcillosos. Prospect.
- Castillo, C., Mejía , C., & Arévalo, J. (2011). Texto paralelo sobre diseño de experimentos al completo azar.
- Chiaravalotti, A., Ravera, & Laidi. (2008). Nuevas Determinaciones en Combustibles y Lubricantes. II Encuentro de Jóvenes Invetigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Buenos Aires: Asociación Argentina de Materiales.



- Comisión Europea. (2013). Libro Verde: sobre una estrategia europea frente a los residuos de plásticos en el medio ambiente. Bruselas.
- Conesa, J. A. (1996). Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Alicante: Universidad de Alicante.
- Cordero López, J. A. (2003). Evaluación de las Propiedades Físico-Químicas del Biodiesel Obtenido a partir de Aceite de Palma y Etanol, como Combustible Alternativo del Diesel 2D. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Cunliffe, A., Jones, N., & Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of composite plastic waste. *Environmental Technology*.
- Curtis, C., & et al. (s.f.). Oilfield Review. Recuperado el 22 de Mayo de 2014, de Yacimientos de petróleo pesado: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish02/win02/p32\\_55.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish02/win02/p32_55.pdf)
- ECOPLAS. (2011). Manual de Valorización de los Residuos Plásticos. Buenos Aires: 5ta edición.
- Elias Castells, X., & Velo García, E. (2005). La pirolisis: Tratamiento y valorización energética de residuos. En X. Elias Castells. Madrid, España.
- EMAC EP, Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca. (2009). Estudio de la situación socio- económica de los recicladores y sus organizaciones en las ciudades de Quito, Cuenca, Guayaquil, Portoviejo, Manta y Loja. Cuenca.
- Escorza Núñez, J. G. (2007). Estudio de inóculos bacterianos como biorremediadores de suelos contaminados con petróleo. Riobamba, Ecuador.
- Espin, G. (24 de Septiembre de 2007). Plásticos y Contaminación Ambiental. La Unión de Morelos, págs. 30 - 30.
- Espinoza, E. e. (2009). Modelo de Gestión de Residuos Plásticos. Mensoza-Argentina: II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.
- Fajardo Villaquiran, A. J. (2011). Diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa. Santiago de Cali.
- Gao, F. (2010). Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. Canterbury.

- García, S. (2009). Referencias Históricas y Evolución de los Plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros, 71-80.
- Hidalgo Loaiza, H. A. (2012). Diagnóstico del Manejo de los Residuos Sólidos Plásticos y de las Actividades de Reciclaje que se Promueven en la Ciudad de Puerto Montt y el Análisis de una Propuesta de Segregación de Residuos Sólidos Plásticos Aplicable a una Población De La Ciudad. Puerto Montt, Chile: Universidad Austral de Chile.
- INEN. (1984). Norma Técnica Ecuatoriana 0930. Petróleo, Crudo y sus Derivados. Muestreo. Ecuador.
- INEN. (2012). Disposición de desechos plásticos post-consumo. Requisitos. Quito-Ecuador: NTE INEN 2634:2012.
- INEN, I. N. (2001). Productos Derivados del Petróleo. Determinación de la Densidad API.
- Kaminsky, W. (1993). Recycling of polymers by pyrolysis. JOURNAL DE PHYSIQUE IV.
- Leiva Chacón, J. L., & Torres Gualpa, J. P. (2007). Caracterización y reciclado por extrusión del EVA de desecho ETIL VINIL ACETATO. Salgolquí: ESPE.
- MAVDT, M. d. (2004). Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y Manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Bogotá, Colombia: Xpress Estudio Gráfico.
- MAVDT., M. d. (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.
- Miliarium. (s.f.). Miliarium.com. Obtenido de Portal de referencia para la Ingeniería Civil, Construcción y el Medio Ambiente: <http://www.miliarium.com>
- Montoya, S., & Páez, C. (2012). Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos en aguas residuales. . Pereira.
- Navarro Martínez, R. (2007). Pirólisis catalítica de polietileno . Estudio de la evolución de la distribución de productos y desactivación del catalizador. Alicante.
- Obra Colectiva Edebé. (2011). Tecnologías II, Proyecto AMPERE. Barcelona : Edebé.

- Organización Panamericana de la Salud, (2002). Análisis sectorial de residuos sólidos Ecuador. Bajado (enero, 2013).
- <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsars/e/fulltext/analisis/ecuador.pdf>
- Parrales, A., Reyes Vera, M., & Pine Tobar, W. (2012). Cromatografía del Gas Natural. Guayaquil, Ecuador.
- Parres García, F. J. (2005). Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase. Valencia.
- Pedroza, H., & Dicovskyi, L. (2006). Sistema de Análisis Estadístico con SPSS. Managua.
- PlasticsEurope. (2007). Plastics. An Analysis of Plastics Production, Demand and Recovery for 2005 in Europe. . Association of Plastic Manufacturers.
- PlasticsEurope. (2011). Análisis de la Producción, la Demanda y la Recuperación de Plásticos en Europa en 2010. Fabricantes de Plásticos en Europa.
- PNUMA, P. d. (2002). Directrices técnicas para la identificación y el manejo ambientalmente racional de los desechos plásticos y para su eliminación. UNEP/CHW.6/21.
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. Revista Politécnica, 137–144.
- Ramírez García, A., & Katime, I. (2005). Diseño de reactores de polimerización. Revista Iberoamericana de Polímeros, 299-320.
- Rodríguez Porca, P. L. (2010). Obtenido de Polímeros: <http://www.xente.mundo-r.com/explora/quimica3/Polimeros.pdf>
- Rojas Gutiérrez, C. (2009). Determinación de Pesos Moleculares de Crudos y Fracciones Petrolíferas. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.
- Salinas Villacis, J. E., & Vasquez Fuel, R. S. (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.
- San Andrés, M., Chércoles, R., De La Roja , J., & Gómez, M. (2010). Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados. España.

- SEDESOL. (2001). Manual Técnico- Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal.
- Téllez Maldonado, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Urias, D. H. (2006). Métodos estadísticos para la ingeniería ambiental y la ciencia. Cd. Juárez: Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Obtenido de <http://bivir.uacj.mx/LibrosElectronicosLibres/UACJ/ua00001.pdf>
- USal. (8 de Febrero de 2011). Universidad de Salamanca. Obtenido de <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/materiales-ii/contenidos/PLASTICOS.pdf/view>
- Wiley Series in Polymer Science . (2006). Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: Converting Waste Plastics into Diesel. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

## ANEXOS

### ANEXO 1: DATOS OBTENIDOS DE LA CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

<b>CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS UPS</b>								
<b>FECHA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>TIPOS</b>						
		<b>PET (1)</b>	<b>PEAD (2)</b>	<b>PVC (3)</b>	<b>PEBD (4)</b>	<b>PP (5)</b>	<b>PS (6)</b>	<b>OTROS (7)</b>
27/05/2013	g	2195,4	3007,3	0	1220,2	625,96	1533,1	58,97
29/05/2013	g	8219,1	9498,2	312,98	1560,4	893,58	13635	27,22
31/05/2013	g	2334,4	4157	108,32	1616	1898	3312	1515,15
03/06/2013	g	4888,3	4204,8	11,2	916	3185,4	3729	235
05/06/2013	g	4091,4	4790	430	2800	3110	5260	450
07/06/2013	g	9226,1	2494,8	1360,8	4082,3	4672	1270,1	226,8
10/06/2013	g	5741,4	1200	890	2530	2280	2340	610
12/06/2013	g	6958,1	1134	158,76	2585,5	2177,2	2041,2	68,04

<b>CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS UPS</b>								
<b>FECHA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>TIPOS</b>						
		<b>PET (1)</b>	<b>PEAD (2)</b>	<b>PVC (3)</b>	<b>PEBD (4)</b>	<b>PP (5)</b>	<b>PS (6)</b>	<b>OTROS (7)</b>
14/06/2013	g	11720,4	2494,8	453,59	4535,9	2721,6	3764,8	453,59
16/06/2013	g	4567,9	2739,1	127,7	1678,5	3421,6	3847,2	345,3
19/06/2013	g	7638,5	4309,1	181,44	5443,1	4082,3	4445,2	349,27
21/06/2013	g	14669,4	2948,4	136,08	22,68	3401,9	3175,1	317,51
<b>TOTAL</b>		<b>82250,4</b>	<b>42977,5</b>	<b>4170,87</b>	<b>28990,58</b>	<b>32469,54</b>	<b>48352,7</b>	<b>4656,85</b>
<b>Producción diaria</b>	<b>g/día</b>	<b>3290,016</b>	<b>1719,1</b>	<b>166,8348</b>	<b>1159,6232</b>	<b>1298,7816</b>	<b>1934,108</b>	<b>186,274</b>
		1	3				2	

**ANEXO 2: PRUEBAS PARA COMPROBAR EL RENDIMIENTO DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON Y SIN EL USO DE CATALIZADOR ZEOLITA.**

	<b>PRUEBA</b>	<b>PRODUCTO (g)</b>	<b>RESIDUO (g)</b>	<b>% RENDIMIENTO</b>	<b>% REDUCCIÓN DE RESIDUO</b>
<b>Con catalizador</b>	1	0,35	0,14	7	97,2
	2	0,73	0,3	7,3	97
	3	1,34	0,31	13,4	96,9
	4	1,37	0,19	13,7	98,1
	5	2,43	0,18	24,3	98,2
<b>Sin catalizador</b>	6	5,75	0,08	57,5	99,2
	7	4,45	0,03	44,5	99,7
	8	4,94	0,05	49,4	99,5
	9	4,25	0,05	42,5	99,5
	10	4,54	0,05	45,4	99,5
<b>Parámetros fijos</b>					
Tipo de plástico: Polietileno de alta densidad (PEAD)					
Cantidad de plástico: 15g					
Temperatura: 420°C					
Tiempo de residencia: 20 minutos					





#### ANEXO 4: ENSAYOS REALIZADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE RESIDENCIA

PRUEBA	TIEMPO DE RESIDENCIA (min)	PRODUCTO (g)	RESIDUO (g)	RENDIMIENTO (%)	REDUCCIÓN DE RESIDUO (%)	VOLUMEN DE GAS (ml)
ensayo 1.0	30	7,93	0,09	52,87	99,40	1855
ensayo 1.1	30	4,99	0,16	33,27	98,93	1215
ensayo 1.2	30	6,32	0,14	42,13	99,07	1700
ensayo 2.0	60	9,03	0,05	60,20	99,67	1550
ensayo 2.1	60	13,58	0,1	90,53	99,33	660
ensayo 2.2	60	5,99	0	39,93	100,00	1600
ensayo 3.0	120	9,77	0,02	65,13	99,87	1820
ensayo 3.1	120	7,56	0,04	50,40	99,73	1310
ensayo 3.2	120	8,4	0,09	56,00	99,40	1100
<p><b>Parámetros fijos</b>                      Tipo de plástico: Polietileno de alta densidad (PEAD)                      Cantidad de plástico: 15g                      Temperatura: 400°C</p>						

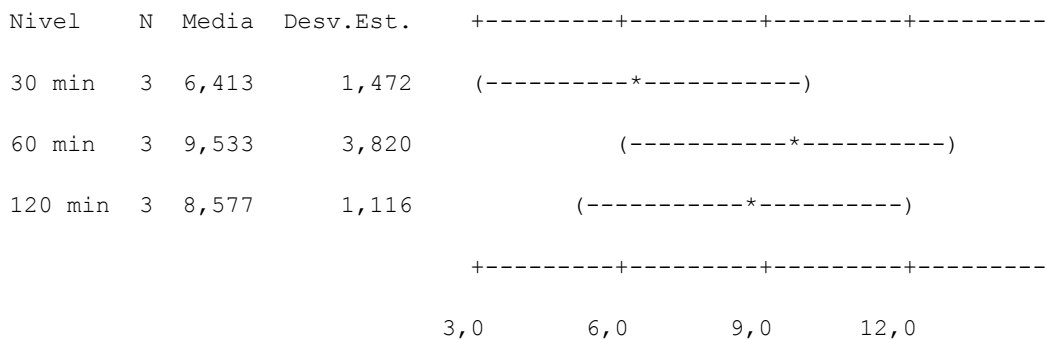
## ANEXO 5: ANÁLISIS ANOVA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA A DIFERENTES TIEMPOS DE RESIDENCIA (30, 60 Y 120 MINUTOS)

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	2	15,33	7,66	1,28	0,345
Error	6	36,01	6,00		
Total	8	51,34			

S = 2,450    R-cuad. = 29,86%    R-cuad. (ajustado) = 6,48%

ICs de 95% individuales para la media

basados en Desv.Est. agrupada



Desv.Est. agrupada = 2,450

## ANEXO 6: ENSAYOS REALIZADOS CON DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS

<b>PRUEBA</b>	<b>TIPO DE PLÁSTICO</b>	<b>PRODUCTO (g)</b>	<b>RESIDUO (g)</b>	<b>% RENDIMIENTO</b>	<b>% REDUCCIÓN DE RESIDUO</b>	<b>VOLUMEN DE GAS (ml)</b>
prueba 1.0	PEAD reciclado	5,49	0,01	36,60	99,93	2300
prueba 1.1	PEAD reciclado	6,1	0,03	40,67	99,80	1960
prueba 1.2	PEAD reciclado	8,25	0	55,00	100,00	1550
prueba 1.3	PEAD reciclado	8,47	0	56,47	100,00	1970
prueba 2.0	PS reciclado	10,89	0,06	72,60	99,60	851

<b>PRUEBA</b>	<b>TIPO DE PLÁSTICO</b>	<b>PRODUCTO (g)</b>	<b>RESIDUO (g)</b>	<b>% RENDIMIENTO</b>	<b>% REDUCCIÓN DE RESIDUO</b>	<b>VOLUMEN DE GAS (ml)</b>
prueba 2.1	PS reciclado	10,97	0,44	73,13	97,07	628
prueba 2.2	PS reciclado	10,89	0,29	72,60	98,07	640
prueba 2.3	PS reciclado	8,38	0,21	55,87	98,60	650
prueba 3.0	PET reciclado	0,62	2,81	4,13	81,27	3465
prueba 3.1	PET reciclado	0,34	2,92	2,27	80,53	2720
prueba 3.2	PET reciclado	0,13	3,04	0,87	79,73	3140
prueba 3.3	PET reciclado	0,19	3,26	1,27	78,27	2750
<b>Parámetros fijos</b>						
Cantidad de plástico: 15g						
Temperatura: 400°C						
Tiempo de residencia: 30minutos						

## ANEXO 7: ANÁLISIS ANOVA DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA CON RESIDUOS PLÁSTICOS DE PEAD, PS Y PET

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	2	206,92	103,46	79,16	0,000
Error	9	11,76	1,31		
Total	11	218,68			

S = 1,143    R-cuad. = 94,62%    R-cuad. (ajustado) = 93,43%

ICs de 95% individuales para la media

basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs
PEAD	4	7,078	1,504	(--*---)
PS	4	10,282	1,269	(--*---)
PET	4	0,320	0,219	(---*---)

---+-----+-----+-----+-----  
 0,0            3,5            7,0            10,5

Desv.Est. agrupada = 1,143

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 97,91%

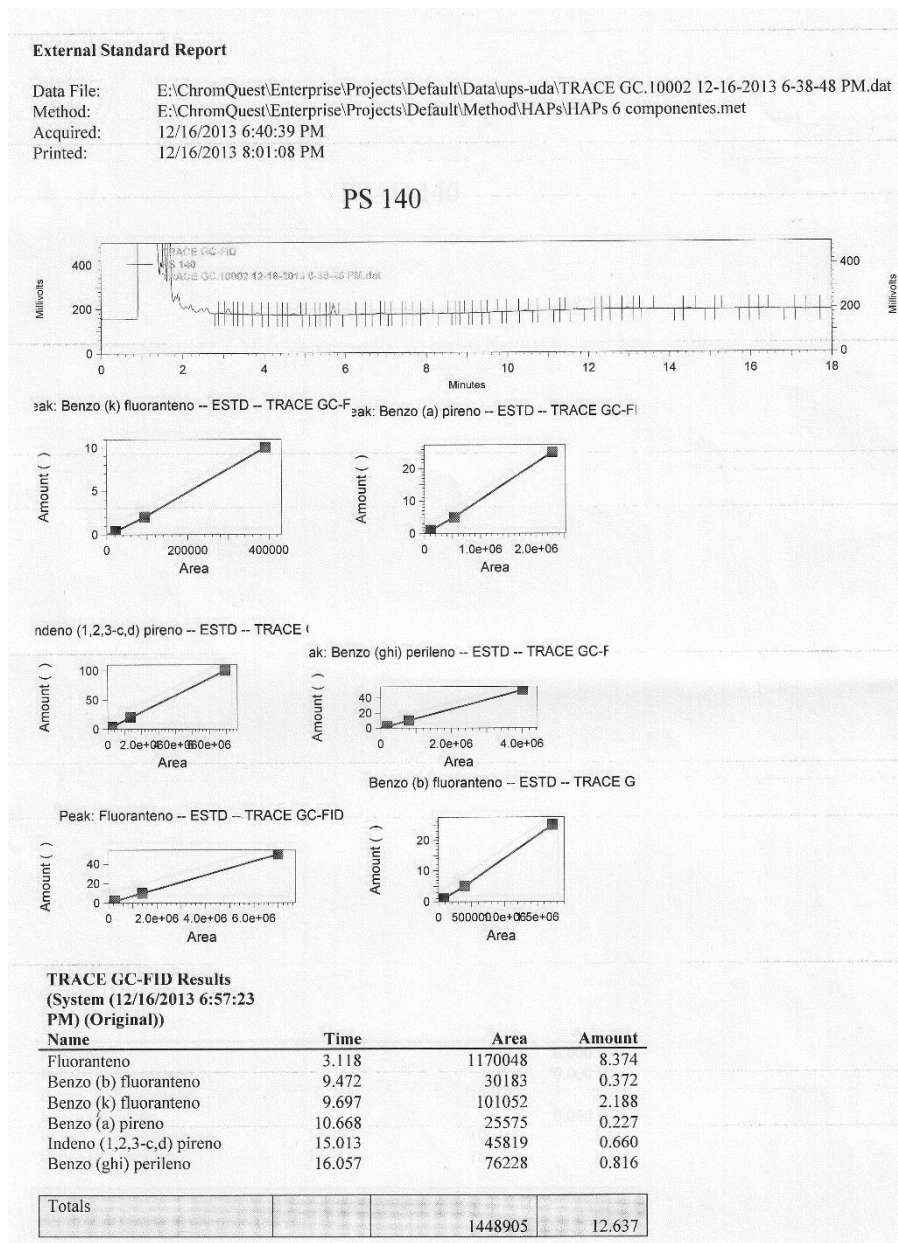
Se restó PEAD a:

	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+--
PS	0,947	3,205	5,463	(---*---)
PET	-9,015	-6,758	-4,500	(--*---)
				-----+-----+-----+-----+--
				-7,0      0,0      7,0      14,0

Se restó PS a:

	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+--
PET	-12,220	-9,962	-7,705	(--*---)
				-----+-----+-----+-----+--
				-7,0      0,0      7,0      14,0

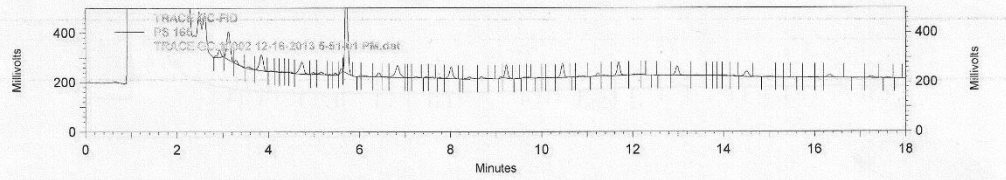
# ANEXO 8: REPORTES DE LA CROMATOGRAFÍA DE PS OBTENIDO A 140°C Y A 165°C, Y DE PEAD OBTENIDO A 140°C Y 170°C.



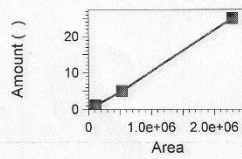
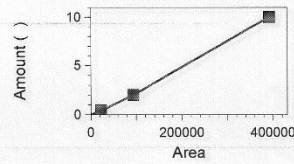
**External Standard Report**

Data File: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Data\ups-uda\TRACE GC.10002 12-16-2013 5-51-01 PM.dat  
 Method: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Method\HAPs\HAPs 6 componentes.met  
 Acquired: 12/16/2013 5:53:21 PM  
 Printed: 12/16/2013 7:59:56 PM

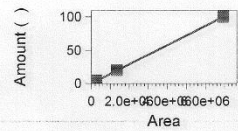
**PS 165**



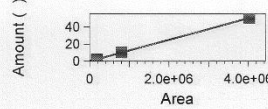
ak: Benzo (k) fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID      ak: Benzo (a) pireno -- ESTD -- TRACE GC-FID



Indeno (1,2,3-c,d) pireno -- ESTD -- TRACE GC-FID

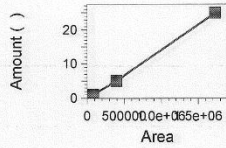
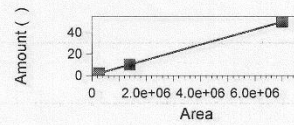


ak: Benzo (ghi) perileno -- ESTD -- TRACE GC-FID



Benzo (b) fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID

Peak: Fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID



**TRACE GC-FID Results  
 (System (12/16/2013 6:10:28 PM) (Original))**

Name	Time	Area	Amount
Fluoranteno	3.125	6137832	43.784
Benzo (b) fluoranteno	9.625	75122	0.925
Benzo (k) fluoranteno	9.700	81398	1.717
Benzo (a) pireno	10.702	23359	0.208
Indeno (1,2,3-c,d) pireno	15.010	136931	1.974
Benzo (ghi) perileno	16.090	112885	1.208

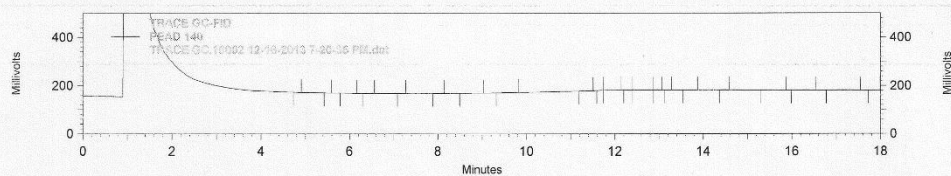
Totals		6567527	49.815
--------	--	---------	--------



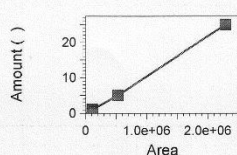
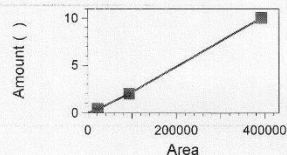
**External Standard Report**

Data File: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Data\ups-uda\TRACE GC.10002 12-16-2013 7-20-36 PM.dat  
 Method: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Method\HAPs\HAPs 6 componentes.met  
 Acquired: 12/16/2013 7:23:11 PM  
 Printed: 12/16/2013 7:45:37 PM

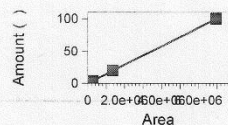
**PEAD 140**



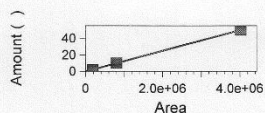
Peak: Benzo (k) fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID



Peak: Indeno (1,2,3-c,d) pireno -- ESTD -- TRACE GC-FID

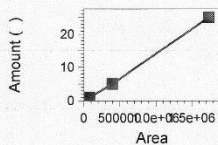
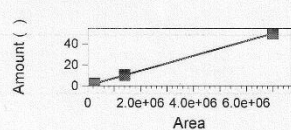


Peak: Benzo (ghi) perileno -- ESTD -- TRACE GC-FID



Peak: Benzo (b) fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID

Peak: Fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID



**TRACE GC-FID Results**  
 (System (12/16/2013 7:42:51 PM) (Original))

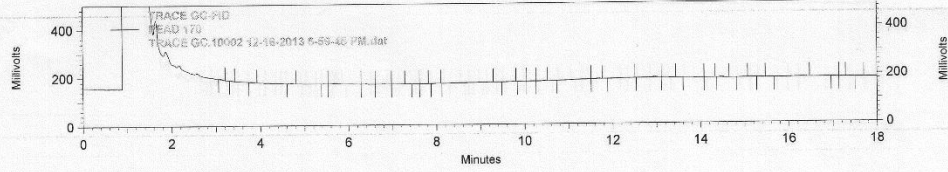
Name	Time	Area	Amount
Fluoranteno			0.000 BDL
Benzo (b) fluoranteno			0.000 BDL
Benzo (k) fluoranteno	9.745	102572	2.229
Benzo (a) pireno			0.000 BDL
Indeno (1,2,3-c,d) pireno	14.487	100465	1.448
Benzo (ghi) perileno	16.315	160233	1.715

Totals		363270	5.392
--------	--	--------	-------

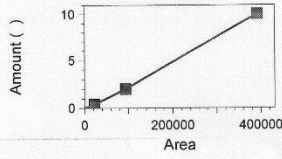
**External Standard Report**

Data File: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Data\ups-uda\TRACE GC.10002 12-16-2013 6-59-48 PM.dat  
 Method: E:\ChromQuest\Enterprise\Projects\Default\Method\HAPs\HAPs 6 componentes.met  
 Acquired: 12/16/2013 7:01:40 PM  
 Printed: 12/16/2013 8:01:44 PM

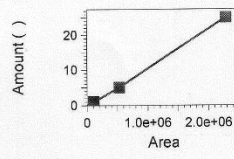
**PEAD 170**



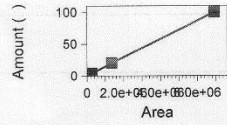
ak: Benzo (k) fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-F



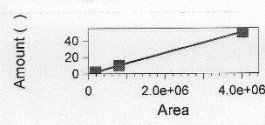
ak: Benzo (a) pireno -- ESTD -- TRACE GC-F



ndeno (1,2,3-c,d) pireno -- ESTD -- TRACE G

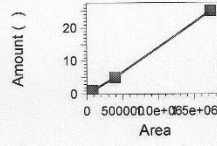
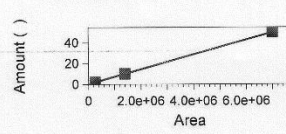


ak: Benzo (ghi) perileno -- ESTD -- TRACE GC-F



Benzo (b) fluoranteno -- ESTD -- TRACE G

Peak: Fluoranteno -- ESTD -- TRACE GC-FID

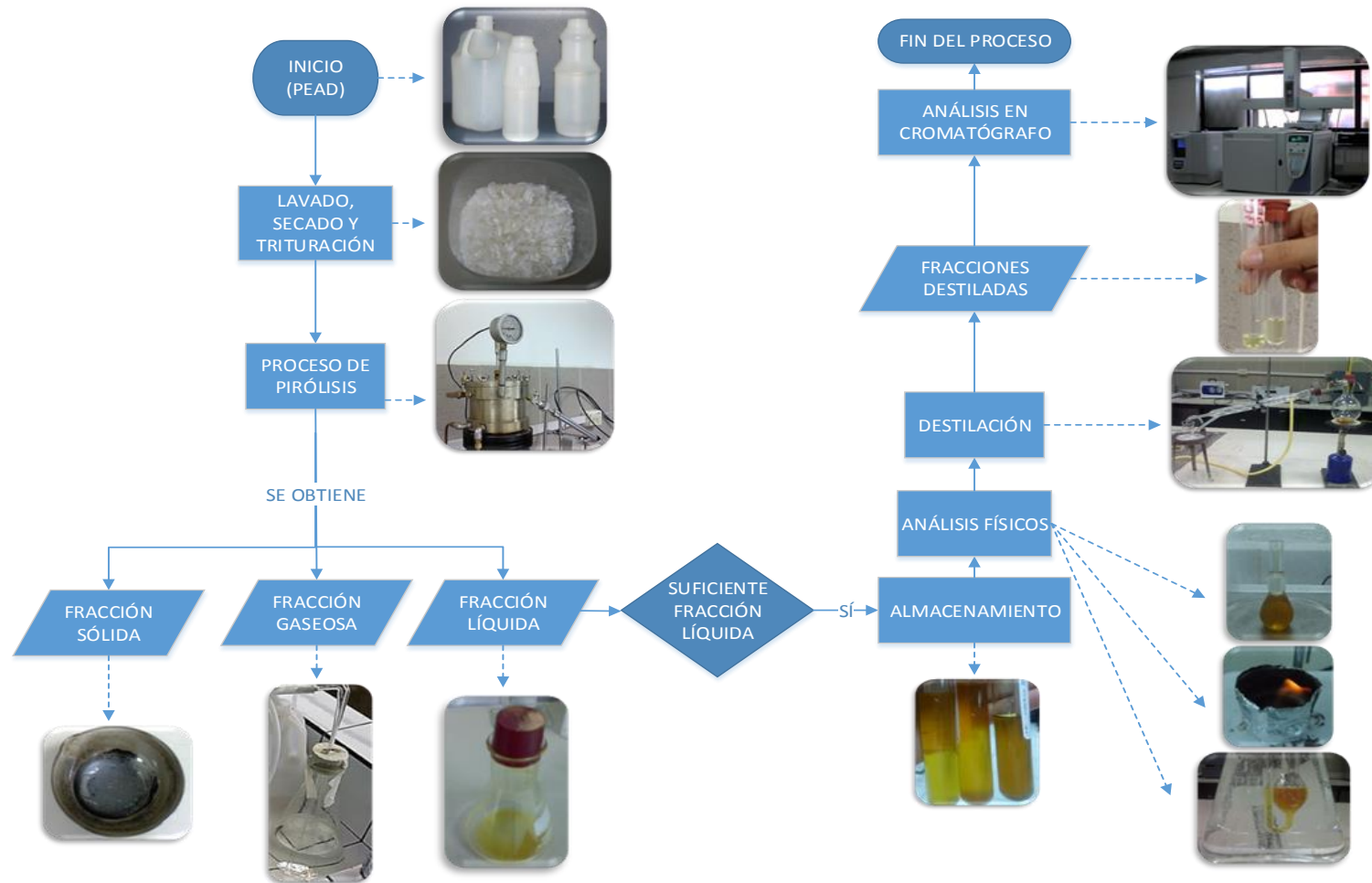


**TRACE GC-FID Results**  
 (System (12/16/2013 7:19:50  
 PM) (Original))

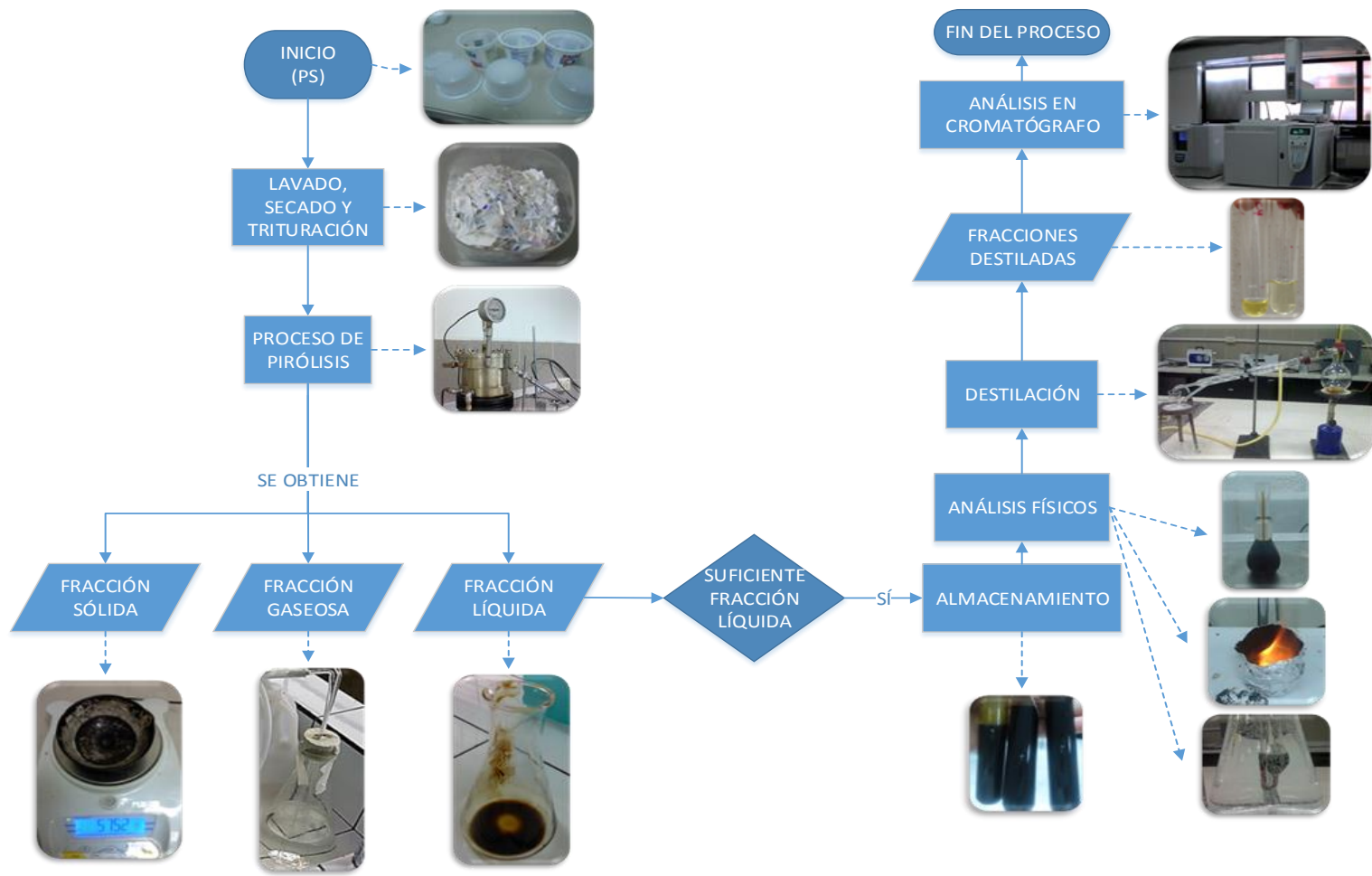
Name	Time	Area	Amount
Fluoranteno	3.103	132058	1.009
Benzo (b) fluoranteno	9.203	515384	6.782
Benzo (k) fluoranteno	9.742	55097	1.128
Benzo (a) pireno	10.448	111622	0.992
Indeno (1,2,3-c,d) pireno	15.025	38796	0.559
Benzo (ghi) perileno	16.307	382690	4.531

Totals		1235647	15.001
--------	--	---------	--------

# ANEXO 9: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD



# ANEXO 10: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO



# ANEXO 11: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE POLIETILENTEREFTALATO

