

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

“DEGRADACIÓN TÉRMICA DE POLIESTIRENOS EN UN
REACTOR PIROLÍTICO TIPO BATCH PARA LA
PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Autores:

SONIA KELLY INTRIAGO MOLINA
PEPÍN ALEX RODRÍGUEZ VELARDE

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2017

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su apoyo emocional y económico.

A mi Tutora MSc Jenny Venegas, por su apoyo y dedicación durante este proyecto.

A MSc. Raul Serrano por su ayuda y conocimiento proporcionado.

A todos lo que colaboraron en el desarrollo del proyecto al Ing. Tyrone Alcívar, Ing Camilo Ramirez, y al personal de mantenimiento de la Universidad.

Sonia Intriago Molina

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra manera ayudaron y colaboraron para la realización de este trabajo, al Ing. Tyron Alcívar, al Ing Camilo Ramírez y especialmente a la MSc. Jenny Venegas Tutora del Proyecto Integrador por su paciencia y su invaluable ayuda.

Pepín Rodríguez Velarde

DEDICATORIA

A Dios por haber permitido culminar mis estudios además de darme paciencia, sabiduría y amor para no desmayar durante el camino de este largo proceso.

A mis padres Edison y Sonia por ser mi guía y mi mayor fortaleza para no rendirme, y por haberme formado con valores de humildad, respeto, amor y responsabilidad.

A mis Hermanas Estefanía y Angie por siempre ser un ejemplo que seguir, por brindarme su apoyo incondicional y motivación constante.

A mi sobrina Sophia, por darme su amor y por ser mi principal motivo de culminar mi carrera para ser un ejemplo para ella.

A mis amigos quienes me han demostrado que son parte de mi familia, apoyándose en los momentos difíciles que se me presentaron durante mi desarrollo profesional.

A mis profesores, por su gran labor que desempeñaron y por formarme profesionalmente.

Sonia Intriago Molina

Este trabajo es dedicado a DIOS y a MIS PADRES

Pepín Rodríguez Velarde

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

SONIA KELLY INTRIAGO MOLINA

PEPÍN ALEX RODRÍGUEZ VELARDE

Y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

SONIA KELLY INTRIAGO MOLINA

PEPÍN ALEX RODRÍGUEZ VELARDE

RESUMEN

Los plásticos tienen una amplia gama de aplicaciones debido a su bajo costo de producción y sus propiedades físicas, a causa de esto se generan residuos de materiales plásticos, que los constituye en una proporción mayoritaria del 60% los contenedores de PET (Tereftalo de Polietileno), y siendo el poliestireno el residuo con una proporción menor se lo considera el más propenso a terminar directamente a vertederos por no ser reciclado mecánicamente afectando negativamente al medio ambiente ya que es un material que no se considera rentable para volver a procesar para la elaboración de nuevos productos.

El presente trabajo consiste en el aprovechamiento de un material plástico desechado, el poliestireno, para la producción de un combustible mediante un proceso de degradación térmica en un reactor pirolítico de capacidad para 1kg de residuo plástico,

El proceso de conversión de este material plástico en combustible se considera una solución viable, a partir de los resultados experimentales se determinó que la eficiencia de producto líquido es de 95%, a temperatura de 350°C, presión atmosférica y un tiempo de reacción de 1 hora.

El producto líquido final está compuesto principalmente de hidrocarburos aromáticos el cual puede utilizarse como combustible o realizar un sistema de recuperación para el monómero de estireno y formar componentes etilbenceno, tolueno consideradas como materia prima para las refinerías de petróleo.

Palabras claves

Plástico, residuos, ambiente, combustible, conversión.

ABSTRACT

Plastics have a wide range of applications due to their low cost of production and their physical properties, because of this they generate residues of plastic materials, that constitute them in a proportion of 60% the containers of PET (Tereftalo de Polietileno) , and the polystyrene being the residue with a smaller proportion is considered the most likely to end directly to landfills for not being mechanically recycled adversely affecting the environment since it is a material that is not considered cost effective to re-process for the production of new products.

The present work consists in the use of a discarded plastic material, the polystyrene, for the production of a fuel by a process of thermal degradation in a pyrolytic reactor of capacity for 1kg of plastic waste,

The conversion process of this plastic material into fuel is considered a viable solution, from the experimental results it was determined that the liquid product efficiency is 95%, at a temperature of 350 ° C, atmospheric pressure and a reaction time of 1 hour.

The final liquid product is composed primarily of aromatic hydrocarbons which can be used as fuel or perform a recovery system for the styrene monomer and form components ethylbenzene, toluene considered as raw material for petroleum refineries.

Keywords

Plastic, waste, environment, fuel, conversion.

SIGLAS

INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
SRI	Servicio de Rentas Internas
PET	Tereftalato de Polietileno
PEBD / LDPE	Polietileno de Baja Densidad
PEAD / HDPE	Polietileno de Alta Densidad
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
PP	Polipropileno
PU	Poliuretano
PC	Policarbonato
ABS	Acroilonitrilo – Butadienestireno
SAN	Estireno Acrilonitrilo
ASEPLAS	Asociación Ecuatoriana de Plásticos
PE	Polietilenos
UV	Ultravioleta
CFCs	Compuestos Clorofluorcarbono
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
HCl	Ácido Clorhídrico
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social de México
FCC	Craqueo Catalítico Fluidizado
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
API	Instituto Americano de Petróleo
SPI	Sociedad de Industrias de Plásticos
NTE	Normalización Técnica Ecuatoriana
ANOVA	Análisis de varianza

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA.....	II
DECLARACIÓN EXPRESA	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
SIGLAS	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO.....	7
1.1 Polímeros	7
1.2 Plásticos.....	8
1.2.1 Clasificación de los Plásticos.....	9
1.2.1.1 Termoplásticos	9
1.2.1.2 Termoestables.....	9
1.2.2 Aditivos para Plásticos.....	11
1.2.3 Identificación de plásticos.....	13
1.2.3.1 Ensayo a la llama	13
1.3 Poliestireno	14
1.3.1 Clasificación y aplicaciones del poliestireno	16
1.4 Residuos Plásticos.....	17
1.4.1 Materiales plásticos en los residuos sólidos urbanos.	18
1.4.2 Gestión de residuos de plásticos	20
1.4.2.1 Reducción	20
1.4.2.2 Reutilizar	20
1.4.2.3 Recuperación de energía:	20
1.4.3 Reciclaje	21
1.4.3.1 Reciclado Mecánico	21
1.4.3.2 Reciclado Químico	22
1.5 Pirólisis.....	24
1.5.1 Condiciones de Proceso.....	25

1.5.1.1	Materia Prima	25
1.5.1.2	Temperatura	26
1.5.1.3	Presión	26
1.5.1.4	Velocidad de Calentamiento.....	27
1.5.1.5	Tiempo de residencia	28
1.5.2	Productos de la descomposición pirolítica	28
1.5.3	Reactor de Pirolisis.....	31
1.5.3.1	Tipos de reactores.....	31
1.6	Combustibles	32
1.6.1	Propiedades de los Combustibles.	34
1.6.1.1	Gravedad API.....	34
1.6.1.2	Punto Inflamación.....	35
1.6.1.3	Punto de Fluidez.....	35
1.6.1.4	Carbón Residual.....	35
1.6.1.5	Viscosidad Cinemática	35
1.6.1.6	Compuestos Saturados, Olefinas y Aromáticos.	36
1.6.1.7	Poder Calorífico.....	36
1.6.1.8	Índice de Refracción.....	36
1.6.1.9	Azufre	37
1.6.1.10	Agua y Sedimentos	37
1.6.1.11	Destilación ASTM.....	38
2.	METODOLOGÍA.....	40
2.1	Obtención de muestras de desechos plásticos	43
2.2	Identificación de los tipos de plásticos	43
2.2.1	Ensayos a la llama.....	43
2.3	Ensayo de pirólisis a nivel de laboratorio	44
2.4	Descripción del reactor pirolítico	44
2.5	Ensayo un reactor pirolítico.....	45
2.6	Pruebas de caracterización.....	46
2.6.1	Grados API	47
2.6.2	Gravedad específica	47
2.6.3	Viscosidad Cinemática a 40°C.....	48
2.6.4	Poder calorífico.....	48

2.6.5	Carbón Residual Conradson.....	49
2.6.6	Punto de inflamación	50
2.6.7	Índice de refracción	50
2.6.8	Punto de fluidez.....	51
2.6.9	Contenido de saturados, aromáticos y olefinas	51
2.6.10	Contenido de Azufre	53
2.6.11	Color ASTM	53
2.6.12	Contenido de Agua y Sedimento	54
2.7	Validación de datos por análisis estadístico ANOVA	54
3.	RESULTADOS	56
3.1	Muestreo de desechos en el campus universitario.....	56
3.2	Identificación de plásticos en laboratorio.....	58
3.2.1	Ensayo a la llama	58
3.3	Proceso de pirólisis de PS reciclado	62
3.3.1	Determinación de los parámetros de pirolisis a nivel de laboratorio.	62
3.4	Destilación del combustible alternativo	67
3.5	Ensayos de caracterización	70
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
4.1	Muestreo de los desechos generados en el campus universitario	79
4.2	Identificación de los desechos plásticos.....	79
4.3	Clasificación de los desechos plásticos	79
4.4	Proceso de pirólisis	79
4.5	Destilación del producto líquido.	80
4.6	Ensayos de caracterización	80
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
5.1	Conclusiones.....	84
5.2	Recomendaciones.....	85
6.	REFERENCIA	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estadísticas de hogares que clasifican según tipo de Residuos.....	2
Figura 2. Centro de Acopio de Reciclaje de Botellas PET.	3
Figura 3. Obtención de masa de residuos en el campus universitario.	4
Figura 1. 1. Estructura química general del poliestireno.	15
Figura 1. 2. Efecto de la presión sobre la distribución de productos de pirólisis ...	26
Figura 1. 3. Efecto de la presión sobre el rendimiento de gas a diferentes temperaturas.....	27
Figura 1. 4. Escisión de la cadena polimérica.....	29
Figura 1. 5. Escisión β de radical primario.	29
Figura 1. 6. Ruta 1 de la estabilización del radical secundario.....	30
Figura 1. 7. Transferencia Intermolecular de hidrógeno.....	30
Figura 1. 8. Reacciones de terminación de la degradación polimérica.	30
Figura 1. 9. Rendimiento de productos en la degradación catalítica de plásticos usando una unidad FCC catalizada.	31
Figura 2. 1. Diagrama del proceso.....	42
Figura 2. 2 Ensayo a la llama de Vaso Desechable.....	43
Figura 2. 3. Sistema de ensayo de pirólisis de laboratorio.....	44
Figura 2. 4. Sistema de proceso de pirólisis.	45
Figura 2. 5. Sistema de destilación ASTM.	46
Figura 2. 6. Determinación de Gravedad API, Método de Hidrómetro.	47
Figura 2. 7. Viscosímetro Cinemático.	48
Figura 2. 8. Calorímetro IKA.....	49
Figura 2. 9. Determinación de Carbón Conradson.....	49
Figura 2. 10. Determinación de Punto de Inflamación.	50
Figura 2. 11. Refractómetro.	51
Figura 2. 12. Determinación de Punto de Fluidez.	51
Figura 2. 13. Identificación de compuestos saturados, olefinas y saturados.	52
Figura 2. 14. Columna de Cromatografía e Indicador Fluorescente.....	52
Figura 2. 15. Analizador de azufre.	53

Figura 2. 16. Analizador de Color ASTM.....	53
Figura 2. 17. Equipo de Centrifugación.....	54
Figura B 1. Determinación de masa de residuos sólidos en la universidad.	96
Figura B 2. Separación manual de los materiales plásticos en los residuos sólidos dentro del campus universitario.	96
Figura B 3. Limpiezas de materiales plásticos desechados.....	97
Figura B 4. Secado de los residuos plásticos.....	97
Figura B 5. Material plástico de poliestireno desechado.....	97
Figura B 6. Trituración del material plástico.	98
Figura B 7. Masa de material plástico de PS reciclado.	98
Figura B 8. Alimentación de materia prima en el reactor de pirólisis.....	99
Figura B 9. Sistema del reactor piloto para el proceso de pirólisis.....	99
Figura B 10. Producto Sólido de pirólisis.	99
Figura B 11. Masa de producto sólido generado del proceso de pirólisis.	100
Figura B 12. Determinación de Gravedad API del producto líquido obtenido de pirólisis.....	100
Figura B 13. Determinación de Gravedad API del producto destilado 1.	101
Figura B 14. Sistema de destilación ASTM.....	101
Figura B 15. Residuo de la destilación del producto líquido de pirólisis.....	102
Figura B 16. Residuo de la destilación del destilado 1.....	102
Figura B 17. Equipo completo para determinación de carbón conradson.....	103
Figura B 18. Sistema para determinar el residuo carbonoso.	103
Figura B 19. Quema de gases combustibles.....	104
Figura B 20. Determinación de poder calorífico.	104
Figura B 21. Muestras Equimolares de tolueno - producto analizado.....	105
Figura B 22. Determinación de agua y sedimentos en el producto líquido de pirólisis.	105
Figura B 23. Presencia de sedimento en el producto líquido de pirólisis.	106
Figura B 24. Determinación de agua y sedimento en destilado 1.	106
Figura B 25. Preparación de muestra para análisis de contenido de azufre.	107
Figura B 26. Analizador de azufre.....	107
Figura B 27. Resultados obtenidos del análisis de contenido de azufre.	108

Figura B 28. Determinación de viscosidad cinemática.....	108
Figura B 29. Muestras para determinación de punto de fluidez.	109
Figura B 30. Sistema de ensayo de punto de fluidez.	109
Figura B 31. Flujo estático - Temperatura de punto de fluidez.....	109
Figura B 32. Preparación de muestra para análisis de contenido de aromáticos.	110
Figura B 33. Muestra añadida en la columna de cromatografía para análisis de aromáticos.....	110
Figura B 34. Control de corriente de aire.	111
Figura B 35. Fase de contacto - Indicador fluorescente BYED GEL.	111
Figura B 36. Punto rojo indicador de aromáticos.	112
Figura B 37. Punto amarillo indicador de olefinas.....	112
Figura B 38. Productos líquidos obtenidos.....	113
Figura C. 1. Diagrama de Reactor Pirolítico.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructuras de las unidades poliméricas de los materiales más utilizado.	7
Tabla 2. Densidades aproximadas de los plásticos más comunes.	9
Tabla 3. Clasificación de plásticos según la SPI	10
Tabla 4. Características y usos según tipos de plásticos.	11
Tabla 5. Tipos de aditivos para plásticos y sus principales funciones.	12
Tabla 6. Comportamiento de los plásticos a la llama.	14
Tabla 7. Propiedades físicas del Poliestireno.	16
Tabla 8. Tipo de residuos plásticos.	18
Tabla 9. Generación de residuos por cada país de Latinoamérica y el Caribe.	19
Tabla 10. Clasificación de los polímeros de acuerdo con los componentes para uso de materia prima en la producción de combustible.	25
Tabla 11. Clasificación de acuerdo con la velocidad de calentamiento.	28
Tabla 12. Productos de cortes en el crudo.	33
Tabla 13. Clasificación de hidrocarburos por su estructura química	34
Tabla 14. Tipos de Crudos de acuerdo con la Gravedad API	35
Tabla 15. Características de diseño del reactor de pirólisis.	45
Tabla 16. Muestreo de desechos sólidos generados en el campus	56
Tabla 17. Desechos generados por día	57
Tabla 18. Cantidad de plástico en los desechos.	58
Tabla 19. Resultados de ensayo en la llama.	59
Tabla 20. Material plástico diario del muestreo.	60
Tabla 21. Estimación de material plásticos desechados diarios.	61
Tabla 22. Desechos plásticos generados.	62
Tabla 23. Datos a 300 °C.	62
Tabla 24. Datos a 350 °C.	63
Tabla 25. Datos a 400 °C.	63
Tabla 26. Condiciones del proceso de pirólisis	65
Tabla 27. Rendimiento de los productos.	67
Tabla 28. Estimación de combustible generado del PS reciclado.	67
Tabla 29. Datos de destilación del producto.	68
Tabla 30. Datos de la segunda destilación	69

Tabla 31. Gravedad API y gravedad específica del producto.	70
Tabla 32. Resultados de pruebas de porcentaje de carbón Conradson	70
Tabla 33. Resultados de pruebas de poder calorífico.	71
Tabla 34. Resultados de pruebas de punto de fluidez.	72
Tabla 35. Resultados de la viscosidad cinemática.	73
Tabla 36. Resultado de pruebas de punto de inflamación.	74
Tabla 37. Resultados de pruebas de índice de refracción	75
Tabla 38. Propiedades de mezcla producto-diésel	76
Tabla 39. Comparación de productos.	77

INTRODUCCIÓN

A medida que existe un crecimiento en las industrias manufactureras de la elaboración de productos plásticos, se genera mayor producción de desechos plásticos en Ecuador, la carencia de implementación de políticas y códigos reglamentarios para el manejo de residuos plásticos hace que la disposición final sean un impacto negativo en los recursos medios-ambientales, debido a que no se eliminan de manera apropiada y se depositan en los vertederos incrementando la masa de los rellenos sanitarios, además el mal manejo de recolección llega a causar bloqueos en las alcantarillas provocando efectos negativos en la salud por las inundaciones generadas, o en otras casos terminan en los mares, ríos, océanos provocando la muerte y deterioro de especies marinas.

En la actualidad por el bajo costo de producción y las buenas propiedades y resistencias del material plástico hacen que esta industria se fundamente en unas de las potenciales en el desarrollo económico, se estima un consumo per cápita de $20 \frac{kg}{año}$ de productos plásticos en Ecuador, estos analizados ante consumos promedios de los países Europeos y de Norte América que es de $120 \frac{kg}{año}$ (Villarino, 2014).

El informe emitido en el año 2015 por Asociación de Manufacturas de Plásticos muestra una estimación de la generación de plásticos post-consumo de 25,8 millones de toneladas de desechos plásticos que culminaron en los residuos agua arribas, del cual se recuperó 69.2% a través de reciclaje y producción de energía, el 30.8% culminaron en basureros (Association of Plastic Manufacturers, 2015).

En Ecuador, según el informe del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) realizado en diciembre del 2016 nos muestra que dentro de los hogares en una totalidad de muestra de análisis de 114086 personas pertenecientes a 30338 hogares el 41,46% clasifica sus residuos, mientras el 58,54% no lo clasifica por diversos motivos, uno de ellos y el principal con un 42,80% es que no tienen contenedores específicos, seguido por no saber clasificar y otros no les interesa y no conocen los beneficios de reciclar (INEC , 2017).

Los residuos urbanos son clasificados en 34,08% en residuos plásticos, seguido con un 25,06% de residuos orgánicos, 24,53% de cartón-papel y 15,10% de vidrio como se muestra en la figura 1.

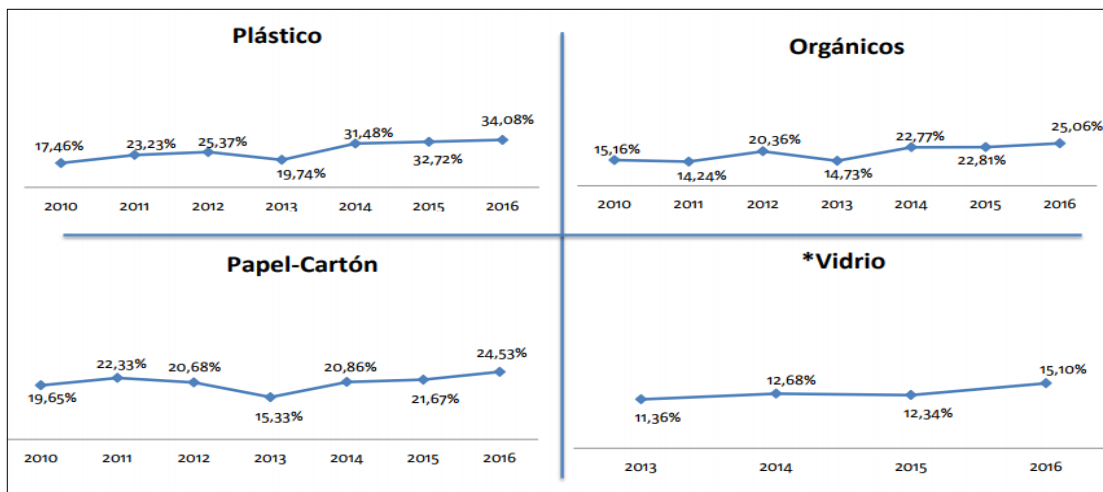


Figura 1. Estadísticas de hogares que clasifican según tipo de Residuos.

Fuente: (INEC , 2017)

En los residuos plásticos, su mayor constituyente son los contenedores de PET (Tereftalato de Polietileno); Ecuador produce anualmente 1 300 millones de botellas plásticas de gaseosas, jugos entre otras, de las cuáles en el año 2012 se reciclaron el 30%, mientras que en 2013 se incrementó al 80%, debido que a partir de este material reciclado se generan otros productos plásticos no alimenticios que sirven para los hogares e industrias como escobas, juguetes, cuerdas, hilos, además el SRI (Servicio de Rentas Internas), estableció una tarifa de 0,56 USD/kg de botellas plásticas lo que hace que las personas reciclen para obtener un beneficio económico, otro material que es comúnmente reciclado es el PEBD (polietileno de baja densidad) y el PEAD (polietileno de alta densidad), entre ellos tenemos envases de productos de limpieza (suavizante, detergente, cloro), fundas de mercados, tapas enroscables, envases de lácteos; estos materiales son reciclados mecánicamente debido al poco consumo energía y fácil limpieza para reprocesarlos y obtener materia prima reciclada para la elaboración de productos como bolsas para desechos de las industrias, juguetes u otros contenedores no alimenticios, al igual que el PP (polipropileno) que por tener su T_g (temperatura de transición vítrea) entre -15 a -25°C y su T_m (temperatura de cristalización) aproximadamente de 160°C menor a la del PS (poliestireno), se realiza un reciclado mecánico ya que su

temperatura de operación no permite consumir mayor energía en su transformación; al contrario del PS que requiere una mayor energía, ya que su T_g es de 100°C y su T_m tiene un valor de 235°C , por lo que no es recomendable aplicar un reciclado mecánico debido a que no tiene un costo asequible, razones por la cual decidió estudiar y analizar la posibilidad de efectuar un tratamiento químico que reduzca el porcentaje de desechos de PS que lleguen al relleno sanitario (El Telegráfo, 2013) (SRI, 2015).



Figura 2. Centro de Acopio de Reciclaje de Botellas PET.

Fuente: (El Comercio, 2015)

Las importaciones de poliestireno en el año 2016 fueron aproximadamente de 10000 TM (ASEPLAS, 2016), como se observa en el Gráfico 1.

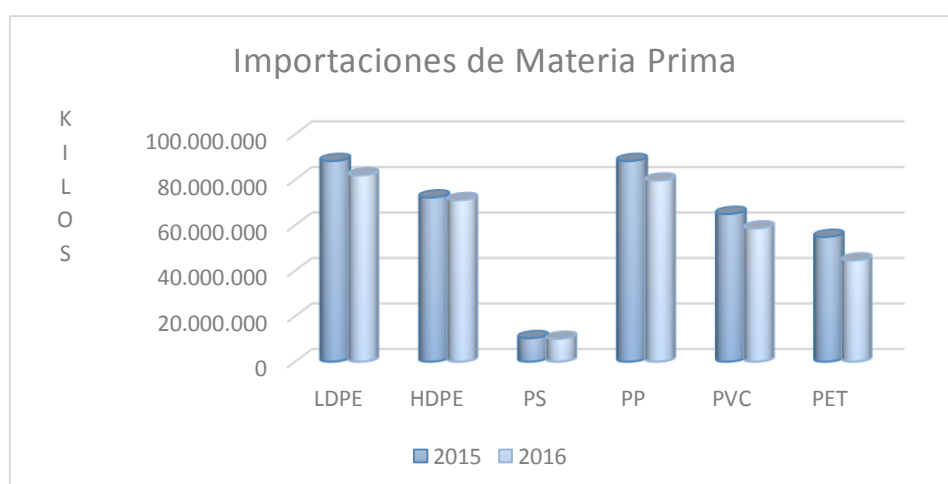


Gráfico 1. Importaciones de polímeros de enero 2015 a diciembre 2015.

Fuente: ASEPLAS, 2016

Los desechos plásticos constituyen el 16% del total de residuos generados en el campus, correspondiente a 1.7 TM mensual según el análisis de las estimaciones realizadas (Intriago & Rodríguez, 2017).



Figura 3. Obtención de masa de residuos en el campus universitario.

Por las razones anteriormente mencionadas, el alcance del proyecto se basa en producir un combustible alternativo a partir del desecho plástico conformado de poliestirenos, usando un proceso de pirólisis; con ello se puede generar una estrategia adecuada para la gestión de los desechos producidos en el campus universitario, siendo la propuesta un desarrollo sostenible ya que produce una nueva fuente de energía.

Por consiguiente, como objetivo general se tiene

- Producir un combustible alternativo a partir de desechos de PS generados en el campus de la universidad, mediante una degradación térmica a escala piloto.

Se necesita realizar los siguientes objetivos específicos para poder alcanzar el objetivo principal del proyecto

- Caracterizar los desechos plásticos a través de un sistema de muestreo realizado en el campus para la obtención de materia prima (PS reciclado).
- Establecer los parámetros de operación de la pirólisis mediante ensayos de laboratorio para estimar la eficiencia del proceso

- Determinar las características del combustible alternativo mediante pruebas físicas-químicas para la relacionar sus propiedades con otros combustibles (Diésel-Gasolina).

Debido aquello se probará la siguiente hipótesis enunciada

Con la producción de un combustible mediante un proceso de degradación térmica de los desechos de PS generados en el campus universitario provocará la reducción de impactos ambientales por contaminantes plásticos.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Polímeros

La palabra polímero se deriva del griego poli-muchos y meros-partes, los polímeros son macromoléculas compuestos de muchas unidades de repetición más pequeñas, denominadas monómeros, que están unidas entre sí (Wade, 2012), tal como se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Estructuras de las unidades poliméricas de los materiales más utilizado.

Polímero	Monómero
Polietileno	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Tereftalato de polietileno	$\left(\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right)_n$
Policloruro de vinilo	$\left[\begin{array}{cc} \text{Cl} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Polipropileno	$\left(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right)_n$
Poliestireno	$\left[\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_n$

Fuente: (Callister, 2007)

Las macromoléculas a menudo se forman con más de 10000 monómeros. En algunos casos la repetición es lineal, como una cadena con eslabones, en otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas, formando retículos tridimensionales (Billmeyer, 2004).

Los polímeros se clasifican según su origen en biopolímeros orgánicos producidos por organismos vivos, tales como caucho, la lana, la celulosa, quitina, etc.; y polímeros orgánicos sintéticos que se obtienen por síntesis química, estos son usados para pinturas, materiales de construcción, fibras, mobiliarios, adhesivos y especialmente para plásticos.

En 1838, se polimerizó accidentalmente el cloruro de vinilo, siendo el primer polímero sintético orgánico preparado. Poco después se descubrió el poliestireno, debido a la polimerización espontánea que sufre el estireno puro (Wade, 2012).

1.2 Plásticos

Los plásticos se componen de polímeros y otros materiales que se añaden para dar al polímero mayor funcionalidad. El contenido de polímero en un plástico puede variar ampliamente desde menos del 20% hasta casi el 100%. Aquellos plásticos que consisten enteramente de polímeros se denominan grados primarios. El nivel y el tipo de los otros aditivos utilizados dependen de las aplicaciones a las que se destina el plástico. (Wade, 2012)

Los plásticos son materiales económicos, ligeros y duraderos, que se pueden moldear fácilmente en una variedad de productos que encuentran uso en una amplia gama de aplicaciones. Como consecuencia, la producción de plásticos ha aumentado notablemente en los últimos 60 años.

Sus densidades varían entre 0.80 y 1.5 $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$, mostrada en la tabla 2.

Tabla 2. Densidades aproximadas de los plásticos más comunes.

Polímeros	Densidad ($\frac{gr}{cm^3}$)
PET	1,38-1,41
PEAD	0,94-0,98
PEBD	0,89-0,93
PVC plastificado 40%	1,19-1,35
PVC Rígido	1,38-1,41
PVC Clorado	1,47-1,55
PP	0,85-0,92
PS	1,04-1,08

Fuente: (Braun , 1990)

1.2.1 Clasificación de los Plásticos

Los plásticos se clasifican principalmente en termoplásticos y termoestables. Esta distinción se basa tanto en la estructura molecular como en las rutas de procesamiento que pueden aplicarse. También se relaciona con las rutas de reciclaje, ya que cada categoría necesita un enfoque diferente para utilizar su potencial de recuperación (Francis, 2017).

1.2.1.1 Termoplásticos

Son moléculas largas rectas o ligeramente ramificadas, manteniendo las cadenas poliméricas cerca unas de otras por fuerzas débiles secundarias del tipo Vander Waals. Durante el calentamiento, a medida que la temperatura aumenta, se reducen las fuerzas secundarias y el deslizamiento de estas moléculas de cadena larga puede ocurrir fácilmente uno sobre el otro a un nivel de tensión reducido (Rajput, 2007).








1.2.1.2 Termoestables

Los plásticos termoestables tienen la característica de endurecer al calentarse. Al iniciar el tratamiento térmico se origina entrecruzamiento covalente entre sus cadenas moleculares. Sólo el calentamiento a temperaturas muy elevadas causa roturas de los enlaces entrecruzados y por consiguiente la degradación del

polímero. Generalmente son polímeros más duros, resistentes, frágiles y mayor estabilidad dimensional a comparación de los termoplásticos. Entre los polímeros reticulados y entrecruzados tenemos el caucho vulcanizado, los epóxidos y las resinas fenólicas y de poliéster (Callister, 2007).

Los materiales termoestables requieren calor y presión para poder ser moldeados y son ideales para componentes que necesiten rigidez, resistencia y soporte al calor. En general, las resinas formadas por condensación son termoestables, tienen estructura molecular tridimensional y tienen pesos moleculares muy altos debido a que son duras, resistentes y quebradizas. Por lo tanto, no pueden ser ablandados o remodelados como en el caso de resinas termoplásticas (Rajput, 2007).

Tabla 3. Clasificación de plásticos según la SPI

Número	Abreviatura	Nombre completo
	PET	Tereftalato de polietileno
	PEAD (HDPE)	Polietileno de alta densidad
	PVC	Vinilo, Policloruro de vinilo
	PEBD (LDPE)	Polietileno de baja densidad
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	Otros	Engloba demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU), Acrilonitrilo-butadienestireno (ABS), Policarbonato (PC), Biopolímeros.

Fuente: (INEN, 2012)

Tabla 4. Características y usos según tipos de plásticos.

Plástico	Características	Usos
PET	Envase frágil, totalmente transparentes, cristal, tienen en el centro del fondo del envase un punto.	Envases de Bebidas, contenedores de aceite comestible, ensaladas, postres y aderezos, bolsas y bandejas térmicas para microondas.
PEAD	Se caracterizan por ser gruesos, pueden de diversos colores, opacos, rígidos, presentan una línea a lo largo y fondo del cuerpo.	Envases para productos alimenticios, empaques para detergentes, suavizantes, blanqueadores, cubetas, cajas para cosméticos, juguetes, depósitos de gasolina, envoltura industrial, tuberías, tapas roscas.
PVC	Son transparentes, presentan abrazaderas o asa y una línea que se encuentra a lo largo del cuerpo y fondo del contenedor.	Etiquetas para envases contenedores de leche, gaseosas, yogurt, gelatina, mangueras, marcos de ventanas y puertas principalmente se usa PVC rígido, piezas de automóvil, aislamiento térmico, tapetes, envases de shampoo.
PEBD	Se pueden pigmentar, aunque son utilizados más comúnmente para película transparente.	Película Adhesiva, bolsas, film agrícola, revestimiento de cartón de leche, recubrimiento de cables eléctricos.
PP	Este puede presentarse traslúcido o pigmentado, es un plástico opaco	Recipientes de yogurt, margarinas, fibras de alfombras, muebles de jardín, aparatos médicos, equipaje, electrodomésticos, tuberías, botellas para almíbar.
PS	El cristal es transparente y rígido, se presenta como PS expandible que es espumado.	Contenedores desechables para alimentos, tazas para bebidas calientes juguetes, protectores electrónicos y material aislante.
Otros	Se presentan en forma de mezclas de plásticos.	Contenedores de agua, leche, jabón, jugo, productos aeronáuticos.

Fuente: (INEN, 2014)

1.2.2 Aditivos para Plásticos

Los aditivos son productos que se agregan a los plásticos en pequeñas cantidades para mejorar la calidad de procesamiento, apariencia y rendimientos en la fabricación del material polimérico.

En la tabla 5 se muestran los diferentes aditivos y sus principales efectos en el material.

Tabla 5. Tipos de aditivos para plásticos y sus principales funciones.

Tipo de Aditivos	Función	Ejemplo
Material de relleno Mineral	Mejorar rigidez y dureza superficial.	Carbonato de calcio, talco.
Fibras	Mejora la adherencia, estabilidad térmica, y resistencias a los ambientes ácidos y alcalinos, resistencia mecánica.	Aramida (poliamida aromática), carbono, vidrio, fibras naturales.
Colorantes	Efectos en la apariencia del material.	Pigmentos ya sean líquidos o en polvo, olores de color.
Pigmentos negros y blancos	Mejora la conductividad térmica.	Negro de carbón, dióxido de titanio, negro de Humo.
Resistencia al calor	Retardan o previenen la oxidación del polímero bajo calor.	Antioxidantes y estabilizadores.
Resistencia a los rayos UV	Actúa como retardante de la oxidación del producto final que se encuentre bajo exposición prolongado a la luz solar.	Estabilizadores.
Retardan de llama	Evita la ignición del polímero.	Reactivo.
Antiestáticos	Aumenta la conductividad eléctrica y evita la descarga electrostática.	Aditivos conductivos.
Anti-Microbiano	Controlar el curado de las resinas	Catalizadores, Inhibidores.
Reticuladores	Promueven enlaces entre polímero y aditivos.	Agentes de acoplamiento.
Plastificantes	Flexibilidad.	Ftalatos.
Agentes de soplado-expansión	Para la producción de espumas y plásticos expandidos, es un sustituto de clorofluorcarbono (CFCs).	Gas inerte o químico.
Lubricantes	Reduce el deslizamiento y bloqueo de película.	Antideslizantes, agentes de desmoldeo y antibloqueo.

Fuente: (Murphy, 2001)

1.2.3 Identificación de plásticos

Una de las principales características evaluadas en la identificación de plástico es la observación del comportamiento del plástico frente a la llama.

1.2.3.1 Ensayo a la llama

Las características del comportamiento frente a la llama son importantes. Algo que se arda en la llama puede mantenerse o dejar de quemar después de ser retirarlo. Para determinar esto, la base de los plásticos debe mantenerse en la llama lo suficiente como para que se queme muy claramente. Sólo después de eso, se puede quitar de la llama. A veces se extingue muy lentamente. El color de la llama y la naturaleza del humo también pueden ayudar en la identificación como se muestra en la Tabla 6 (Verleye, Roeges, & De Moor, 2001).

Tabla 6. Comportamiento de los plásticos a la llama.

Tipo de plástico	Comportamiento frente a la llama
PET (PETE)	Arde en llama Continúa ardiendo después de retirarla Llama amarillo-naranja con humos negros fragante aromático.
PE	Arde en llama Continúa ardiendo después de retirarla Llama azul con extremo amarillo Funde y gotea Gotas arden Olor a vela
PVC	Arde en llama Deja de arder después de retirarla Llama amarilla difícil de encender Llama con brillo y leve con color verde Olor acre
PP	Arde en llama Continúa ardiendo después de retirarla Llama azul con extremo amarillo Funde y gotea Gotas arden Olor a vela Muestra dura y rígida resistente al rayado
PS	Arde en llama Continúa ardiendo después de retirarla Llama amarilla Humos densos con copos de hollín Olor a gas de ciudad

Fuente: (Braun , 1990)

1.3 Poliestireno

El poliestireno se considera como un polímero de bajo costo y fácil de procesar. Los productos fabricados de poliestireno, incluso con aditivos, tienen propiedades de bajo rendimiento y no son considerados como plástico de ingeniería (Poliámidas, Poliacetales, Poliéster). Sin embargo,

el polímero de estireno se utiliza en muchas aplicaciones en las que las propiedades mecánicas y la resistencia química no son críticas.

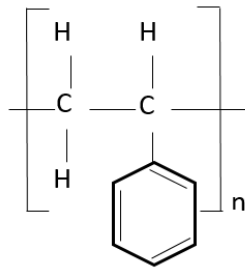


Figura 1. 1. Estructura química general del poliestireno.

Fuente: (Harper & Petrie, 2003)

El poliestireno puede ser sintetizado a través de muchos mecanismos tales como radicales libres, aniónicos, catiónicos y reacciones de Ziegler. Tienen excelentes propiedades eléctricas, baja contracción, alta estabilidad dimensional durante el moldeo y la formación, buena resistencia al agua, productos químicos inorgánicos, y alcoholes, y mala resistencia a muchos solventes. Las principales desventajas que tienen los plásticos de poliestireno es su fragilidad (el alargamiento es sólo 1-3%), la susceptibilidad al disolvente, el agrietamiento por estrés ambiental (que a menudo requiere un recocido antes del acabado) y la inflamabilidad. Otras desventajas incluyen mala resistencia a la intemperie y al calor.

Las propiedades generales del poliestireno se muestran en la Tabla 7, las cuales son muy dependientes del tipo de relleno, grado y modificación de la resina.

Tabla 7. Propiedades físicas del Poliestireno.

Propiedades	UND	Poliestireno Uso General	Poliestireno Alto Impacto
Gravedad específica	-	1.04	1.04 – 1.07
Resistencia a la tracción	psi	5,000 – 10,000	3,300 – 5,100
Elongación	%	1.0 – 2.3	30 – 50
Resistencia a la flexión	psi	10,000 – 15,000	5,000
Uso continuo de Temperatura	°C	71- 96	52 – 74
Fuerza dieléctrica	$\left[\frac{\text{voltios}}{\text{mil}} \right]$	> 500	300 – 650

Fuente: (Harper & Petrie, 2003)

1.3.1 Clasificación y aplicaciones del poliestireno

El poliestireno de alto impacto (HIPS) se produce mezclando físicamente estireno y varios elastomas tales como butadieno. Los HIPS se usan para productos electrónicos, juguetes, video, audio-casetes y envases de alimentos.

El poliestireno también se clasifica de acuerdo con sus características de procesamiento. El poliestireno de alto fluido tiene el peso molecular más bajo y contienen 3 - 4 % de aceite mineral. Se utilizan en vajillas desechables, juguetes y envases. El poliestireno de flujo medio se utiliza para piezas moldeadas por inyección, juguetes, artículos médicos, botellas moldeadas por soplado y envases de alimentos extruidos. El PS de alta resistencia al calor tiene el mayor peso molecular y el nivel más bajo de aditivos. Se utiliza para aplicaciones que requieren extrusión de láminas y termoformado.

El poliestireno expandido se utiliza para el aislamiento térmico, material de embalaje y a menudo para las bandejas del alimento. El poliestireno también puede estar reticulado. El material de poliestireno reticulado se usa a menudo en aplicaciones eléctricas y electrónicas de baja pérdida que requieren una resistencia moderada a la temperatura.

Puede ser procesado por casi todos los procesos termoplásticos convencionales extrusión, termoformado, moldeo por inyección y soplado, Los productos de poliestireno pueden ser terminado por la mayoría de los métodos, incluyendo la impresión, pintura, metalización al vacío y soldadura con disolvente o térmica.

La copolimerización también se utiliza para producir plásticos de ingeniería de mayor rendimiento y mayores precios, como acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y estireno acrilonitrilo (SAN) (Harper & Petrie, 2003).

1.4 Residuos Plásticos

El conjunto de materiales poliméricos, plásticos o resinas que se reprocesan para un posterior uso se denominan residuos plásticos. (Tesoro, 1987).

El origen de los residuos plásticos es orgánico, ya que se fabrican de compuestos orgánicos, tal como el etano compuesto presente en el gas natural, también se fabrican a partir de algunos derivados del petróleo (Jaramillo & Zapata, 2008).

La producción de plásticos se ha incrementado como resultado de una mala gestión de residuos por esta razón anualmente un aproximado de 8 millones TM de plásticos terminan en los mares y océanos, constituyendo del 60 al 80% de la basura marina Los residuos plásticos se dividen en cuatro categorías según la Tabla 8 (Greenpeace, 2016).

Tabla 8. Tipo de residuos plásticos.

Plásticos poco degradados y limpios	Al ser molidos pueden ser incorporados al proceso de origen
Plástico poco degradados y contaminados	No se puede volver a agregar al proceso de origen, se procesan para otro tipo de uso o aplicación.
Mezclas de plásticos con composición conocida.	Básicamente están libres de componentes no poliméricos.
Residuos plásticos con composición desconocida.	Están contaminados con materiales no poliméricos.

Fuente: (Conseca, 1996).

Las fases del ciclo del plástico son la mezcla, la fabricación, el transporte, el envasado y disposición del consumidor final, en todas estas fases se producen residuos plásticos. Alrededor del 60% de los residuos plásticos son generados en el post-consumo, el 17% corresponde a desechos industriales y el 23% restante corresponde a desperdicios municipales tal como tuberías cables juguetes, etc. (Conseca, 1996).

1.4.1 Materiales plásticos en los residuos sólidos urbanos.

De acorde al régimen del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2014) , se define residuo solido a cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido, resultante del consumo o uso de un bien tanto en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que no tiene valor para quien lo genera, pero que es susceptible de aprovechamiento y transformación en un nuevo bien con un valor económico agregado.

Tabla 9. Generación de residuos por cada país de Latinoamérica y el Caribe.

País	Generación per cápita (kg/hab/día)		Tasa de Reciclaje %
	Residuo Sólido Domicilio	Residuo Sólido Urbano	
Argentina	0,77	1,15	-
Barbados	0	0,9	9
Bélice	0	1	-
Bolivia	0,46	0,49	-
Brasil	0,67	1,04	1
Chile	0,79	0,25	10
Colombia	0,54	0,69	17,2
Costa Rica	0,63	0,88	0,3
Ecuador	0,62	0,73	-
El Salvador	0,5	0,89	-
Guatemala	0,48	0,61	-
Guyana	0	1,5	19,3
Haití	0	0,7	-
Honduras	0,61	-	-
Jamaica	0,71	-	-
México	0,58	0,94	9,6
Nicaragua	0,73	-	-
Panamá	0,55	1,22	-
Paraguay	0,69	0,94	-
Perú	0,47	0,75	14,7
República Dominicana	0,85	1	-
Surinam	0	1,4	-
Trinidad y Tobago	0	1,8	8,2
Uruguay	0,75	1,03	-
Venezuela	0,65	0,86	-

Fuente: (BID, 2017)

La composición de residuos varía de acorde con la cultura que está asociados con los niveles de ingreso, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico y estándares de calidad de vida de la población. Los sectores de mayores ingresos son lo que generan una cantidad mayor en volumen de residuos por ejemplo Argentina,

Brasil, Guyana, Panamá y Surinam, tal como se muestra en la Tabla 9 (Jaramillo & Zapata, 2008).

1.4.2 Gestión de residuos de plásticos

El manejo de residuos plásticos comprende un conjunto de procedimientos y políticas dentro de una gestión ambiental económicamente apropiada; los diferentes procesos integrados en la gestión de residuos son: generación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final (Hidalgo, 2012).

La gestión actual de residuos se basa en un enfoque jerárquico de tres niveles:

1.4.2.1 Reducción

La reducción consiste en minimizar el consumo de diferentes plásticos mejorando el diseño de los productos, des esta manera se disminuye el consumo de materia prima y la generación de desechos cuando llegan al final de su ciclo de (Aracil, 2008).

1.4.2.2 Reutilizar

La reutilización es la operación por el cual los envases se rellenan o se utilizan para el mismo fin que fueron fabricados, sin hacer uso de productos auxiliares (Vida, y otros, 2012).

1.4.2.3 Recuperación de energía:

Los residuos plásticos usados pueden ser aprovechados como combustible debido a su elevado poder calorífico; por ejemplo: 1 kg de polietileno tiene un poder calorífico inferior aproximado de 46 MJ/kg, que es la misma energía que produce 1 kg de fuelóleo o de gas natural (Aracil, 2008).

1.4.3 Reciclaje

El reciclaje se define como un proceso que reintegra al ciclo de consumo los materiales presentes en los residuos sólidos urbanos que están aptos para elaborar otros productos (SEDESOL, 2001).

1.4.3.1 Reciclado Mecánico

Los materiales plásticos se pueden reciclar de diferentes maneras, y la facilidad de reciclado varía dependiendo del tipo de polímero, el diseño del envase y el tipo de producto. Por ejemplo, los recipientes rígidos que consisten en un único polímero son más sencillos y más económicos de reciclar que los envases multicapa o multicomponentes (Hopewell Jefferson, 2009).

Los termoplásticos, incluyendo PET, PE y PP, tienen un alto potencial para ser reciclado mecánicamente. Los polímeros termoestables tales como poliéster insaturado o resina epoxídica se pulverizan en partículas finas porque no pueden ser reciclados mecánicamente, de esta manera se reutilizan como material de relleno (Rebeiz K., 1995).

En el reciclado mecánico un factor importante a considerar es la compatibilidad entre los diferentes tipos de polímeros cuando se mezclan debido al hecho de que la presencia de pequeñas cantidades de un polímero dado disperso en una matriz de un segundo polímero puede cambiar dramáticamente las propiedades de este último, impidiendo su posible uso en aplicaciones convencionales. Por ejemplo, la presencia de bajas cantidades de PVC en PET reciclado, que son difíciles de separar de otros desechos plásticos, reduce fuertemente el valor comercial de este último por la liberación de HCl durante el re-procesamiento del PET (Hulse, 2000).

Otra dificultad que presenta el reciclado mecánico es la presencia de productos hechos de la misma resina con diferentes colores, que cuando se mezclan suelen impartir un color gris indeseable al plástico reciclado (Aguado, Serrano, & Clark, 1999).

1.4.3.2 Reciclado Químico

El reciclaje químico o de materia prima es un proceso donde se produce la descomposición del polímero para la obtención de los materiales iniciales como los monómeros (Fomento, 2013), también se usa para producir productos hidrocarbonados que pueden ser utilizados en la producción de nuevos polímeros, productos químicos refinados o combustibles. Existe una variedad de tratamientos químicos que pueden incluirse en esta categoría, como la despolimerización química, la gasificación, el craqueo térmico y la conversión catalítica (Serrano & Aguado, 2007).

1.4.3.2.1 Despolimerización química

La despolimerización química es la reconversión directa de un polímero a los monómeros de partida, para poder nuevamente a ser polimerizados; es aplicable a macromoléculas de policondensación como el PET o poliamidas, también polímeros de adición como los poliuretanos. La despolimerización química se efectúa por reacciones de metanólisis, hidrólisis y glicólisis (Ramos, 2005)

1.4.3.2.2 Gasificación

La gasificación implica la oxidación parcial de la materia orgánica a altas temperaturas (típicamente entre 1200-1500°C) en condiciones ligeramente oxidantes (normalmente vapor, dióxido de carbono u oxígeno subestequiométrico). El objetivo de la gasificación es la producción de gas de síntesis, que consta principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno, para la aplicación en la síntesis de productos

químicos, como el metanol y el amoníaco, y puede utilizarse para producir gasóleo sintético o puede ser quemado directamente como combustible (Serrano & Aguado, 2007).

1.4.3.2.3 Craqueo térmico

El craqueo térmico, o pirólisis, implica la degradación de los materiales poliméricos por calentamiento en ausencia de oxígeno. El proceso se lleva a cabo normalmente a temperaturas entre 500-800°C, y da como resultado la formación de un residuo sólido de carbón y una fracción volátil, que puede separarse en un aceite hidrocarbonado condensable y un gas no condensable de alto valor calorífico (Serrano & Aguado, 2007).

1.4.3.2.4 Conversión catalítica

La conversión catalítica de desechos plásticos tiene varias ventajas sobre los métodos pirolíticos convencionales. La más evidente se refiere a las temperaturas de degradación más bajas a las que tiene lugar la reacción de degradación, lo que da lugar a consumos de energía más bajos con mayores tasas de conversión. Sin embargo, un aspecto aún más importante es la selectividad que muestran algunos catalizadores micro-porosos, que permite dirigir el proceso hacia una estrecha distribución de hidrocarburos con un mayor valor de mercado (Aguado J. , y otros, 2004).

Otra ventaja reside en el efecto de inhibición de los catalizadores en la formación de algunas especies no deseadas, en particular los hidrocarburos clorados en los residuos plásticos contaminados con PVC (Serrano & Aguado, 2007).

1.5 Pirólisis

Una de las tecnologías alternativas para el manejo de los residuos sólidos urbanos y que ofrece prometedoras ventajas, aunque aún se encuentra en proceso de desarrollo tecnológico es la pirólisis. En países desarrollados, como Estados Unidos de América, se ha estado investigando desde hace varios años este proceso fisicoquímico complejo, como una alternativa en el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2001).

La pirólisis es un proceso que consiste en la descomposición fisicoquímica de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante, los productos obtenidos de pirolisis son gases, líquidos y un residuo carbonoso (Aracil, 2008).

La proporción de cada fracción y su composición precisa depende principalmente de la naturaleza de los residuos plásticos usados como materia prima como se muestra en la Tabla 10, pero también de las condiciones del proceso. En el caso de poliolefinas, como polietileno o polipropileno, se ha informado que el craqueo térmico procede a través de un mecanismo de escisión aleatorio que genera una mezcla de olefinas lineales y parafinas sobre una amplia gama de pesos moleculares. En casos como el poliestireno y el polimetilmetacrilato, la degradación térmica se produce por un denominado mecanismo de desenclavamiento que produce una alta proporción de sus monómeros constituyentes (Serrano & Aguado, 2007).

Tabla 10. Clasificación de los polímeros de acuerdo con los componentes para uso de materia prima en la producción de combustible.

Tipos de Polímeros	Descripción	Polímero
Polímero que contiene carbono e hidrógeno	Utilizado como materia prima para la producción de combustible debido a su alto poder calorífico y produce un gas de escape limpio.	PS, PP, HDPE, LDPE.
Polímero que contiene oxígeno	Por su contenido de oxígeno presente hace que disminuya el poder calorífico del aceite.	PET, resinas fenólicas, alcohol polivinílico, polioximetileno.
Polímero que contiene por nitrógeno o azufre	Se considera una fuente de componentes peligrosos debido a la presencia de nitrógeno y azufre forman NO _x o SO _x , en los gases de combustión.	Poliamida, poliuretano son los que contienen Nitrógeno en su cadena, Sulfuro de polivinilideno contienen azufre en su cadena.
Polímero que contiene halógenos de cloro bromo y flúor.	Forman gases de combustión peligrosos y corrosivos durante el tratamiento térmico y la combustión.	Cloruro de polivinilo, Cloruro de polivinilideno, Retardantes de llama que contienen bromo y polímeros fluorcarbonados.

Fuente: (United Nations Environmental Programme, 2009)

Los principales factores que influyen en el proceso de pirólisis plástica y la distribución molecular del producto de pirólisis incluyen la composición química de la materia prima, la temperatura de craqueo y la velocidad de calentamiento, la presión de funcionamiento, el tipo de reactor, el tiempo de residencia y la aplicación de catalizador (Gao, 2010).

1.5.1 Condiciones de Proceso

1.5.1.1 Materia Prima

Es necesario conocer la composición de la materia prima antes de la pirolisis, de ella depende los compuestos que se obtienen al final del tratamiento. La contaminación de los desechos plásticos antes del proceso causa efectos negativos en el proceso de pirolisis, alterando la calidad de los productos obtenidos (Gao, 2010).

1.5.1.2 Temperatura

La temperatura principalmente va a determinar la velocidad de descomposición térmica de los plásticos. A temperaturas mayores de 600 °C tienden a producir mayor cantidad de moléculas gaseosas, mientras a temperaturas menores de 400 °C se van a obtener líquidos más viscosos. En general, la pirólisis de los plásticos comienzan a temperaturas de 300 °C; la presencia de aditivos tales como estabilizantes, plastificantes y pigmentos presentes en los plásticos, influyen en el inicio de la reacción. Por lo general se escoge temperaturas para el proceso entre 400 °C y 500 °C (Kaminsky & Scheirs , 2006).

1.5.1.3 Presión

La presión de operación tiene un efecto significativo tanto en el proceso de pirólisis como en los productos. Los puntos de ebullición de los productos de pirólisis se incrementan al someterse a presiones altas, por lo tanto, bajo un ambiente presurizado, los hidrocarburos pesados son craqueados en lugar de ser vaporizados a una temperatura de operación dada tal como se muestra en la Figura 5 (Gao, 2010).

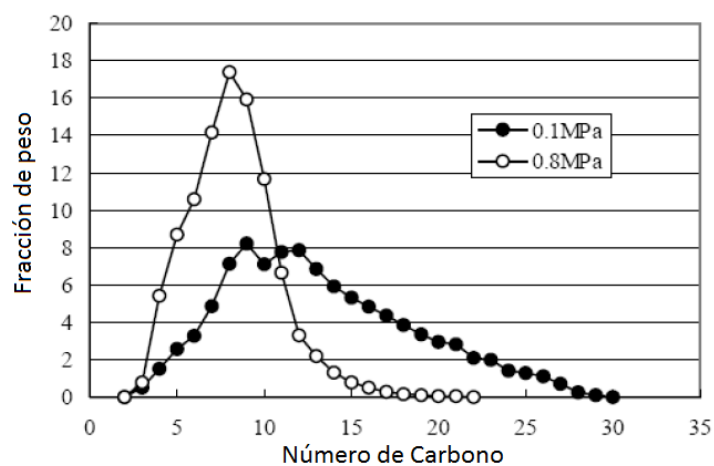


Figura 1. 2. Efecto de la presión sobre la distribución de productos de pirólisis

Fuente: PE (Murata, Sato, & Sakata, 2004)

En efecto, la pirólisis presurizada requiere más energía para el craqueo adicional de hidrocarburos. En la Figura 6 se muestra que la alta presión aumenta el rendimiento de gases no condensables, y disminuye el rendimiento de productos líquidos. El peso molecular medio del producto gaseoso también disminuye con el aumento de la presión (Murata, Sato, & Sakata, 2004).

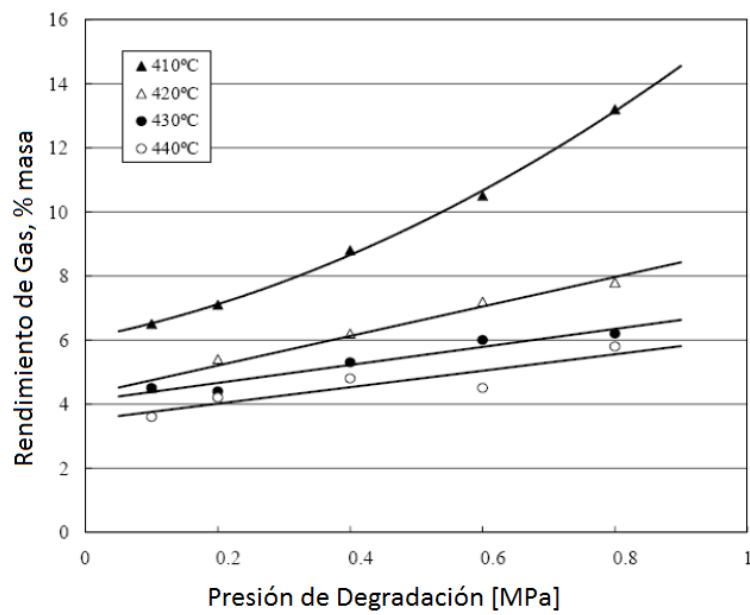


Figura 1. 3. Efecto de la presión sobre el rendimiento de gas a diferentes temperaturas.

Fuente: (Murata, Sato, & Sakata, 2004).

1.5.1.4 Velocidad de Calentamiento

Dependiendo de la velocidad de calentamiento la pirólisis se clasifica en pirólisis lenta y pirólisis flash descrita en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación de acuerdo con la velocidad de calentamiento.

Pirólisis	Características
Pirólisis Lenta	<ul style="list-style-type: none">• La reacción química es la que controla el proceso de descomposición.• Mayor facilidad de obtención de fracción sólida.• Tiempos de reacción que van desde horas hasta días.
Pirólisis flash	<ul style="list-style-type: none">• La transmisión de calor controla el proceso de descomposición• A mayor temperatura aumenta la obtención de gases combustibles

Fuente: (Aracil, 2008).

1.5.1.5 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia al ser mayor favorece a la formación mayoritaria de compuestos gaseosos (Aracil, 2008). El factor determinante para establecer el tiempo de residencia es la temperatura (Kaminsky & Scheirs , 2006).

1.5.2 Productos de la descomposición pirolítica

La descomposición de plásticos puede considerarse como despolimerización de polímero en un producto de bajo peso molecular. La rotura de los enlaces químicos bajo la influencia del calor es el resultado de superar las energías de disociación de los enlaces. Los polímeros orgánicos son muy sensibles térmicamente debido a la limitada resistencia de los enlaces covalentes que forman sus estructuras. La escisión puede ocurrir de forma aleatoria o mediante un proceso de extremo de cadena, a menudo denominado reacción de descompresión (Pielichowski & Njuguna, 2005).

De acuerdo con Hernández Férez, 2007, el mecanismo de degradación térmica de los plásticos consta de las etapas de iniciación, propagación y terminación. (Hernández, 2007)

I. La iniciación

Consiste en la rotura inicial del polímero, puede ocurrir en posiciones aleatorias o en la cadena final tal como se muestra en la Figura 7.

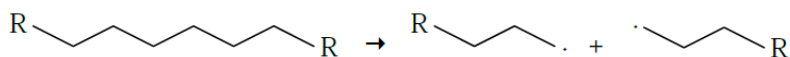


Figura 1. 4. Escisión de la cadena polimérica.

Fuente: (Hernández, 2007)

a. Escisión de cadena final

El polímero se rompe a partir de los grupos terminales produciendo sucesivamente los monómeros correspondientes.

b. Escisión de cadena aleatoria

El polímero se rompe al azar en moléculas más pequeñas de longitudes de cadena variables.

II. La propagación

Es la liberación de fragmentos monoméricos olefínicos a partir de la rotura en posición β del radical primario formado en la etapa de iniciación mostrado en la Figura 8.



Figura 1. 5. Escisión β de radical primario.

Fuente: (Hernández, 2007)

El nuevo radical formado debe estabilizarse y para ello existen 2 posibles rutas.

Ruta 1

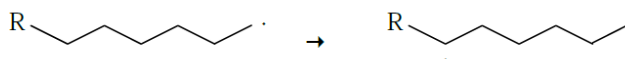
a. Transferencia intramolecular del hidrógeno de la cadena.

Consiste en el paso de un hidrógeno de un carbono a otro dentro de la misma molécula

b. La escisión β de los radicales secundarios

Es la rotura del enlace C-C en posición β respecto al radical

Transferencia intramolecular del Hidrógeno de la cadena.



Escisión β de los radicales secundarios

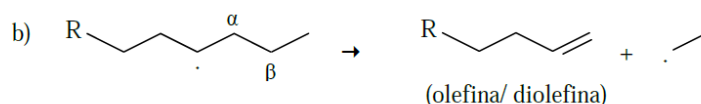
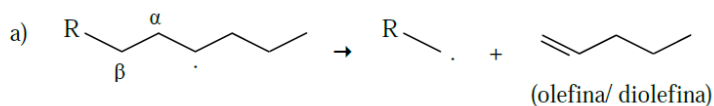


Figura 1. 6. Ruta 1 de la estabilización del radical secundario.

Fuente: (Hernández, 2007)

Ruta 2

a. Transferencia intermolecular de hidrógeno

Es la abstracción de un hidrogeno de una cadena cercana y como resultado da un compuesto saturado.

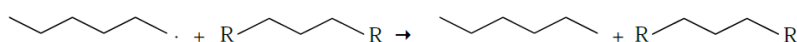


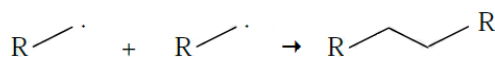
Figura 1. 7. Transferencia Intermolecular de hidrógeno.

Fuente: (Hernández, 2007)

III. La terminación

Esta etapa tiene lugar en modo bimolecular, con el acoplamiento o recombinación de dos radicales para generar una nueva molécula; o por desproporción que da como producto final un alcano y una olefina (Pielichowski & Njuguna, 2005).

Recombinación



Desproporción



Figura 1. 8. Reacciones de terminación de la degradación polimérica.

Fuente: (Hernández, 2007)

Por lo general el rendimiento de gas está por debajo del 20%, el rendimiento del aceite se encuentra por encima del 70% y de los residuos de la pirolisis son menor al 10% con respecto a la alimentación del plástico como se puede observar en la Figura 12 (Kaminsky & Scheirs , 2006).

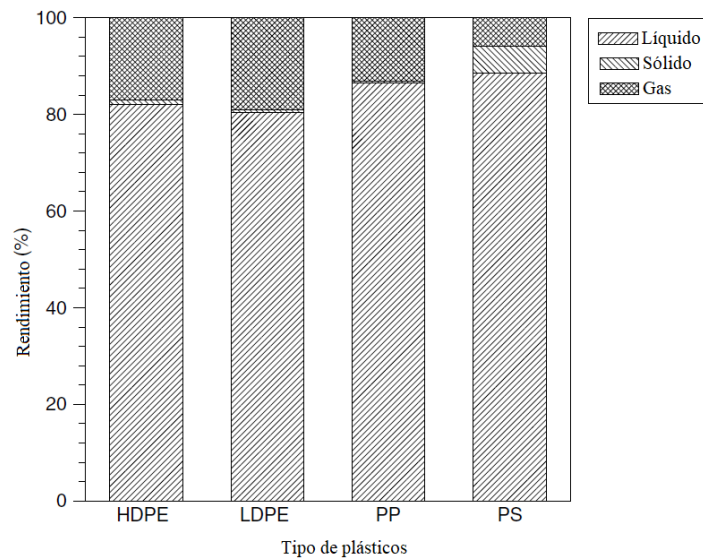


Figura 1. 9. Rendimiento de productos en la degradación catalítica de plásticos usando una unidad FCC catalizada.

Fuente: (Kaminsky & Scheirs , 2006)

1.5.3 Reactor de Pirolisis

El reactor pirolítico es el lugar donde ocurre las reacciones químicas de descomposición de los desechos plásticos (Ramírez & Katime, 2005).

1.5.3.1 Tipos de reactores

De toda la gama de reactores disponibles en la industria, se distinguen 3 tipos diferentes según el régimen de operación, discontinuo o batch, semi-continuo o semi-batch y continuo o tubular mostrados en el Gráfico 2 (Gao, 2010).

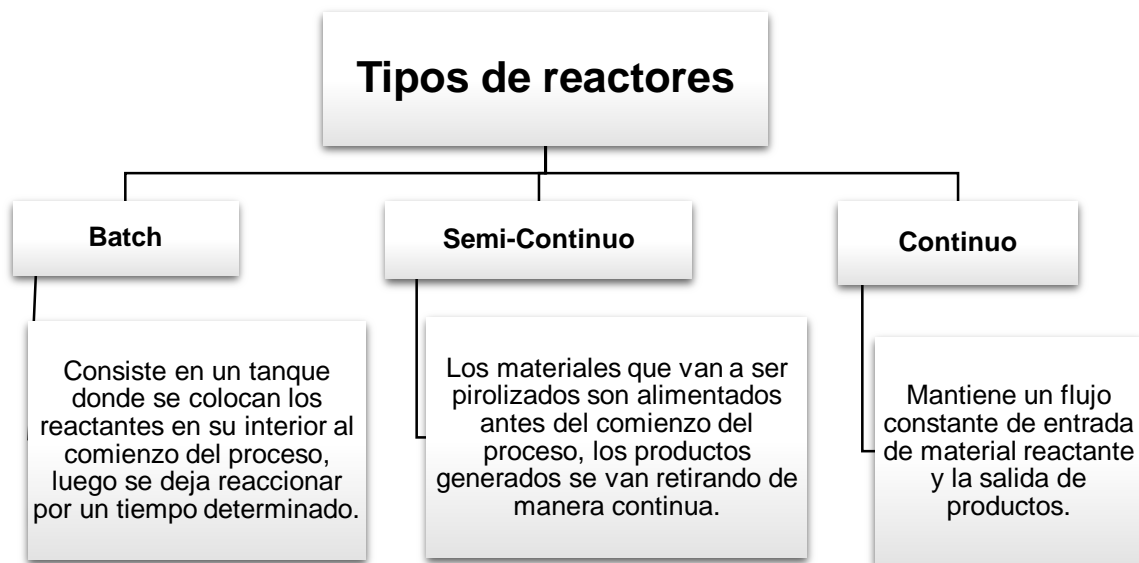


Gráfico 2. Descripción de los tipos de reactores.

Fuente: (Ramírez & Katime, 2005) (Alvarado, 2005) (Espinoza & Naranjo, 2014) (Gao, 2010).

1.6 Combustibles

Se considera un material combustible aquel que se emplea para producir cantidades significativas de calor, los principales elementos invariablemente presentes en los combustibles químicos son el carbono y el hidrógeno, Cuando un combustible químico sufre combustión en el aire, el carbono y el hidrógeno se convierten en dióxido de carbono y agua, En el Gráfico 3 se muestran los diferentes tipos de combustibles según el origen proveniente (Gary & Handwerk, 2003).

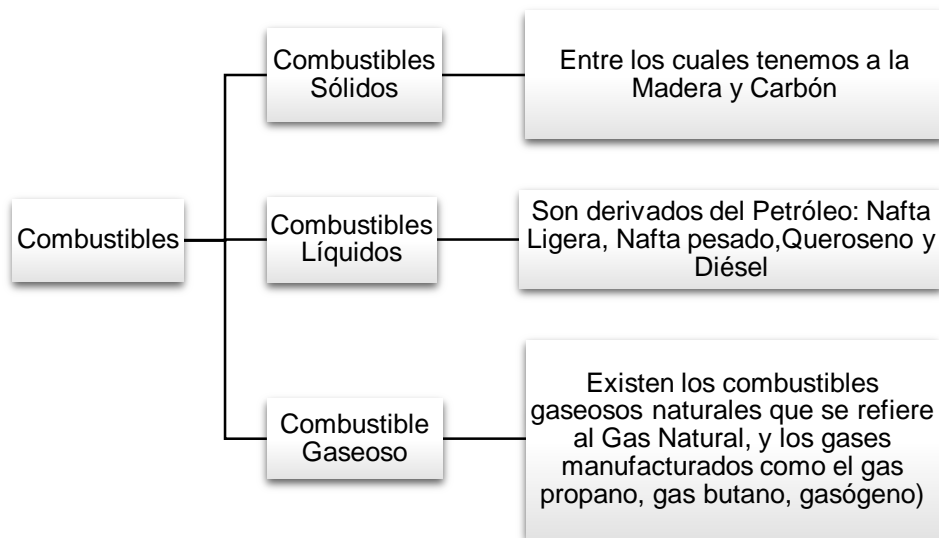


Gráfico 3. Clasificación de los Combustibles según su origen

Fuente: (Gary & Handwerk, 2003)

Para los combustibles líquidos que provienen de la explotación del Petróleo se obtienen diferentes tipos de cortes en la destilación fraccionada realizada para obtener productos comburentes como se describen en la Tabla 12 con su rango de ebullición y número de carbonos.

Tabla 12. Productos de cortes en el crudo

Productos	Número de Carbono	Rango de Ebullición (°C)
Gases	C1-C4	-160 ~ 0
Nafta Ligera	C5-C6	25 ~ 90
Nafta Pesada	C6-C10	85 ~ 190
Queroseno	C9-C15	160 ~ 275
Diésel	C13-C18	250 ~ 340
Jet Fuel	C16-C25	315 ~ 410
Gasóleos Ligeros y Pesados al Vacío	C22-C45	370 ~ 575
Asfalto	C40+	500 ~ 565

Fuente: (Totten, Westbrook, & Shah, 2003)

Existen cuatro tipos básicos de estructura química de hidrocarburos, sus diferencias se refieren a la unión entre los átomos de carbonos ya sean que formen cadenas o moléculas en forma de anillo. En la Tabla 13

muestran las diferentes estructuras según el análisis para determinar tipos de hidrocarburos en los productos líquidos del petróleo por adsorción de indicador de fluorescencia según la norma ASTM D1319.

Tabla 13. Clasificación de hidrocarburos por su estructura química

Tipo de Hidrocarburo	Cadena / Anillo	Saturado / Insaturado	Ejemplo
Parafina	Cadena	Saturado	Hexano
Olefina	Cadena	Insaturado	Hexeno
Nafteno	Anillo	Saturado	Ciclohexano
Aromáticos	Anillo	Insaturado	Benceno

Fuente: (Totten, Westbrook, & Shah, 2003)

1.6.1 Propiedades de los Combustibles.

Las propiedades de los combustibles son medidas de acuerdo con las diferentes normas que regulan las propiedades del crudo y sus derivados tenemos INEN y ASTM.

1.6.1.1 Gravedad API

La gravedad API está relacionada con la gravedad específica de los combustibles derivados del petróleo, la cual tiene una escala arbitraria y se fundamenta en el principio de que la gravedad del líquido varía proporcionalmente con la profundidad de inmersión de un elemento flotando en él considerado como el hidrómetro API, tiene que ser reportada a la temperatura estándar de 15,56°C. Esta propiedad es indispensable para convertir volumen y determinar la densidad relativa del producto en análisis (INEN , 2015).

De acuerdo con la gravedad API se tienen diferentes clases de Crudo que se detallan en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14. Tipos de Crudos de acuerdo con la Gravedad API

Tipo de Crudo	Gravedad API
Crudos Extra-livianos	> 40
Crudos Livianos	> 30 ≥ 40
Crudos Medios	> 22 ≥ 30
Crudos Pesados	> 10 ≥ 22
Crudos Extra-pesados	≤ 10

Fuente: (INEN, 2003)

1.6.1.2 Punto Inflamación

El punto de inflamación es la menor temperatura de un líquido que produce vapor suficiente para formar una mezcla inflamable con aire en existencia de una fuente de ignición (Enright, 2013).

1.6.1.3 Punto de Fluidez

Es la propiedad que mide la temperatura a la cual el fluido tiene la capacidad de congelarse en una masa sólida inmóvil. Además, ayuda como una indicación aproximada de su capacidad de bombeo sometido a temperaturas estandarizadas (ASTM, 2000).

1.6.1.4 Carbón Residual

La cantidad de carbón residual presenta la tendencia de formar coque de un residuo lo cual indica la propensión de la muestra a forma depósitos carbonosos bajo la influencia del calor (Lee, Speight, & Loyalka, 2007).

1.6.1.5 Viscosidad Cinemática

Es la característica que rige el movimiento de los combustibles, es decir mide la resistencia interna al movimiento de un fluido debido a las fuerzas de cohesión entre las moléculas, es necesaria ya que se debe observar el comportamiento de los combustibles en las tuberías cuando se transporta. (Lee, Speight, & Loyalka, 2007)

La viscosidad cinemática nos muestra la relación que existe entre la viscosidad dinámica y la densidad del líquido a la temperatura del ensayo.

1.6.1.6 Compuestos Saturados, Olefinas y Aromáticos.

Los componentes saturados se definen como el porcentaje de alcanos y polialcanos.

Las olefinas presentes en el combustible demuestran que en su composición tienen un porcentaje de alquenos, polialquenos y poco dieno. Las olefinas no existen de forma natural en el crudo de petróleo, pero se forman durante el procesado. Son muy similares en la estructura a las parafinas, pero como mínimo dos de los átomos de carbono están unidos por doble enlaces.

Se refiere a compuestos aromáticos al porcentaje de monocíclicos y policíclicos aromáticos, poliolefinas aromáticas, algunos dienos y compuestos que contienen hidrógeno y sulfuro o compuestos oxigenados de mayor punto de ebullición. Los hidrocarburos aromáticos contienen un anillo bencénico el cual no está saturado, pero es muy estable comportándose frecuentemente como un compuesto saturado. (Gary & Handwerk, 2003)

1.6.1.7 Poder Calorífico

Es un parámetro importante de los combustibles debido a que indica la eficiencia de calentamiento y el rendimiento. Esto se define como la cantidad de calor liberado cuando una cantidad de masa o volumen de un combustible se quema completamente en aire u oxígeno (Shetty & Gadag, 2014)

1.6.1.8 Índice de Refracción

Es una característica física que relaciona la velocidad de la luz en el aire a su velocidad en la sustancia.

1.6.1.9 Azufre

El contenido de azufre es considerable ya que al quemarse en cilindros de los motores con los demás componentes del combustible forman gases y reaccionan con el agua de los productos de combustión, transformándose en líquidos corrosivos, esto causa problemas de corrosión de las paredes frías de los cilindros, principalmente cuando el motor funciona a poca carga y la temperatura de las paredes de los cilindros desciende a una temperatura donde se condensan parte del vapor de agua. (Kates & Luck, 2003)

En el Gráfico 4 se identifican la clasificación según el contenido de azufre en el crudo.

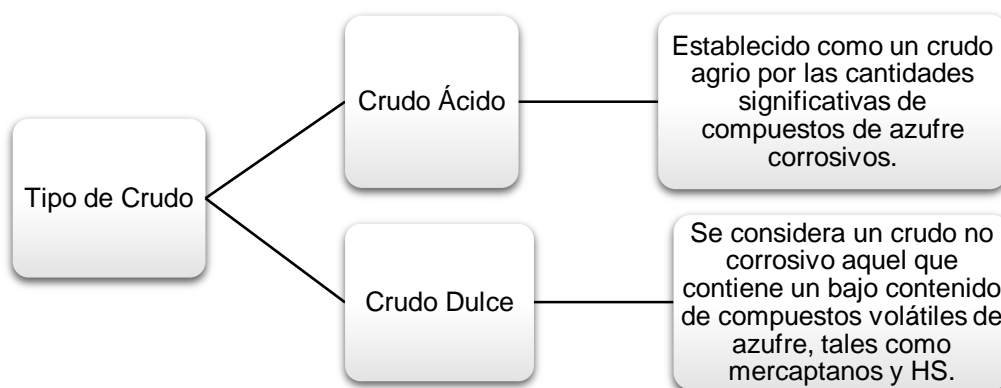


Gráfico 4. Clasificación del Crudo de acuerdo con el contenido de azufre.

Fuente: (INEN, 2003)

1.6.1.10 Agua y Sedimentos

La presencia de agua y sedimentos en los combustibles pueden provocar corrosión y desgastes de los inyectores y la bomba inyectora, además un contenido de agua excesivo puede causar una combustión irregular (Kates & Luck, 2003).

1.6.1.11 Destilación ASTM

La destilación ASTM es considerada para determinar el intervalo de ebullición de un combustible, debido a que el rango de ebullición proporciona información sobre la composición, las propiedades y el comportamiento del combustible durante su almacenamiento se evalúa la formación de gomas cuando sus componentes se han evaporado, también indica la tendencia de la volatilidad de las mezclas de hidrocarburos los cuales producen vapores potenciales con características explosivas. (ASTM, 2017)

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Los residuos plásticos empleados para el proyecto proceden de los desechos generados en la universidad; para determinar la cantidad de desechos producidos se realizó un muestreo en el campus, donde la basura generada es recolectada por una empresa contratista, la cual tiene a su cargo 93 puntos de acopio registrados.

Se establece el tamaño de muestra mediante la Ecuación 1 en la cual σ representa el grado de variabilidad que tiene la muestra que se da $\sigma=0.5$, para muestras desconocidas, debido a que la población de la universidad es infinita, se considera variable por tal motivo se establece un margen de error, E, del 10% con un intervalo de confianza del 0.95 y Z: 1.96, obtenido de la campana de Gauss.

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{E^2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$
$$n = \frac{1.96^2 \times 0.5^2}{0.10^2}$$
$$n = 96 \text{ kg}$$

Una vez determinado el tamaño de muestra se procede al muestreo de los desechos, se hace una separación manual de los desechos plásticos dentro del centro de acopio y posteriormente se realiza un proceso de limpieza y secado para eliminar residuos orgánicos.

Para la identificación de los desechos plásticos se hace uso de los números asignados por cada tipo de plástico según la SPI descrita en la Tabla 3, o se aplica la Tabla 4, donde se describen las características y usos de los plásticos.

Se determina el porcentaje de los plásticos que existe en la basura y se selecciona el tipo de plástico para el proceso de pirólisis. Con la materia prima se procede a ensayos en un sistema de pirólisis de laboratorio para determinar el tiempo y temperaturas para el proceso, en un reactor pirolítico. Finalmente, el producto líquido obtenido de la pirólisis se destila y se procede a caracterizar ambos productos.

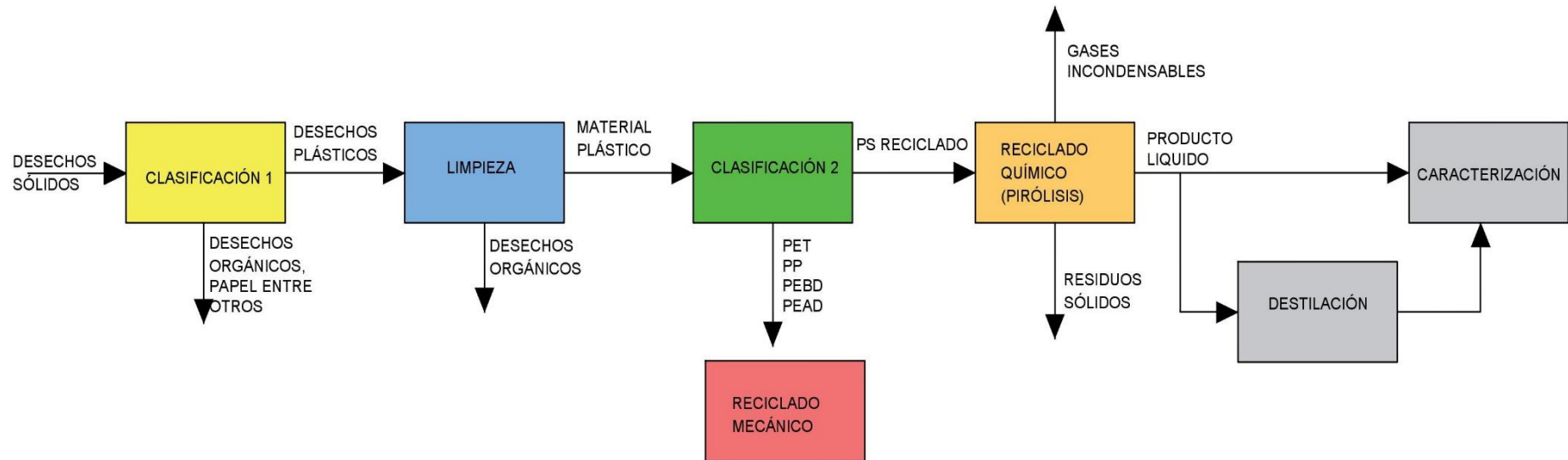


Figura 2. 1. Diagrama del proceso.

2.1 Obtención de muestras de desechos plásticos

Se realizó un muestreo durante 5 días para la estimación de un promedio del porcentaje de plásticos existentes en los desechos; para proceder a realizar un pre tratamiento al residuo plástico que consistió en retirar etiquetas y tapas de los envases, seguido por un proceso de lavado y secado.

2.2 Identificación de los tipos de plásticos

Se identifican los plásticos revisando el número SPI colocado en el producto; los plásticos que no tengan el número se identifican por sus características de uso, y si es necesario, mediante su comportamiento frente a la llama.

2.2.1 Ensayos a la llama

Existen desechos plásticos como sorbetes, cucharas envases de tortas, y envases de alimentos en general que no presentan identificación por el triángulo según la SPI.

Para el ensayo del comportamiento a la llama se coge una pequeña muestra de plástico con pinzas, y se lo expone a la llama de un mechero bunsen. Se observa atentamente como arde el plástico en el interior y fuera de la llama, la coloración de la llama, la formación de gotas de plásticos, si arden o no; si arden o no al alejarse de la llama, el olor del humo después de apagar la llama.

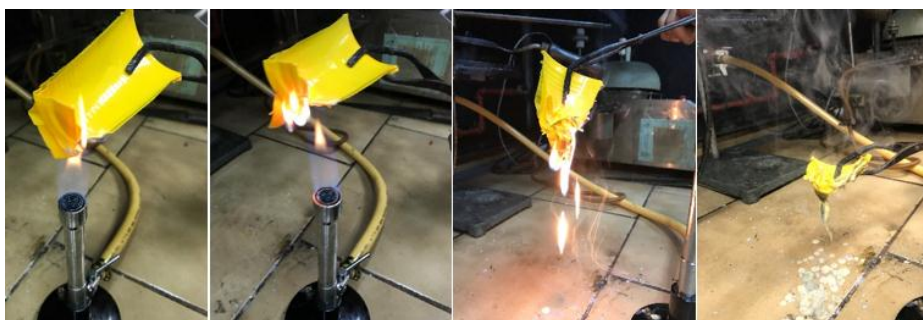


Figura 2. 2 Ensayo a la llama de Vaso Desechable.

Se estima el porcentaje másico de cada plástico para luego determinar la cantidad de desechos individuales generados en el campus universitario.

2.3 Ensayo de pirólisis a nivel de laboratorio

Para la determinar los parámetros de temperatura, presión y tiempo, se realizaron pruebas de pirólisis en un sistema de calentamiento que usa un balón esmerilado conectado con un refrigerante de bola tal como se muestra en la Figura 15.

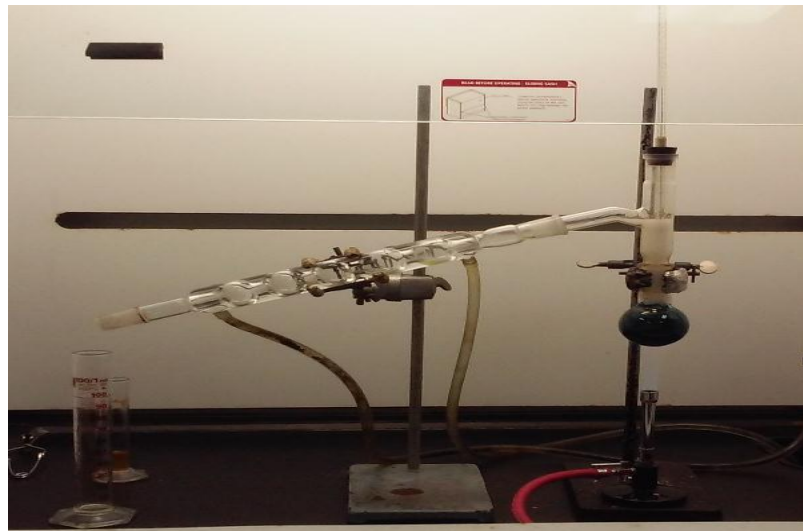


Figura 2. 3. Sistema de ensayo de pirólisis de laboratorio.

2.4 Descripción del reactor pirolítico

La obtención de producto líquido por ensayos de laboratorio tiene un rendimiento bajo, con un máximo de 50 ml por ensayo, con un tiempo de reacción promedio de 2 horas, razones por la que se procedió a la construcción de un reactor pirolítico tipo batch con las características descritas a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Características de diseño del reactor de pirólisis.

Tipo de Reactor	Batch
Capacidad	1 Litro
Material	Acero Inoxidable AISI 304
Dimensiones	30 x 20 cm
Sistema de Calentamiento	Resistencia Eléctrica 3000 (W)
Indicador de Temperatura	Termocupla – Controlador de Temperatura
Medición de Presión	Manómetro 100 psi
Sistema de Enfriamiento	Condensador – Serpentin
Sistema de Aislamiento	Fibra de Cerámica – Recubrimiento Metálico

2.5 Ensayo un reactor pirolítico.

Para la práctica de pirólisis se pesa 1 kg de PS molido que se introduce en el reactor y se procede a cerrar la brida del reactor, inmediatamente se conecta el condensador y se establece un flujo estable de agua de refrigeración, finalmente se enciende la resistencia y se establece la temperatura de operación en el control de temperatura.

Durante aproximadamente 1 hora, dentro del reactor están ocurriendo las reacciones de de-polimeración descritas en el capítulo anterior, al finalizar el producto de la pirólisis es recolectado en un vaso de precipitación de 1 L de capacidad como se muestra en la Figura 16.

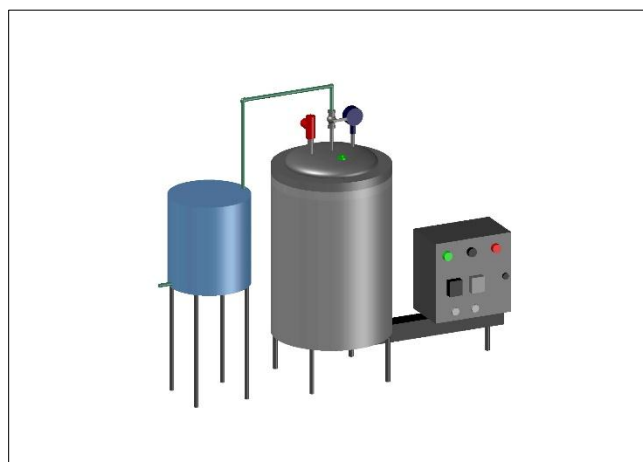


Figura 2. 4. Sistema de proceso de pirólisis.

Se deja enfriar el reactor, para proceder a retirar el residuo sólido y limpiar el interior del mismo; el residuo sólido se retira en vasos de precipitación previamente pesados y se procede a la determinación de su masa. Este procedimiento se realizó varias veces hasta tener muestra suficiente para la caracterización del producto líquido.

El producto líquido se destila en un sistema de destilación ASTM como se muestra en la Figura 17, se repite el procedimiento hasta obtener una cantidad aproximada de 2 litros de destilado para pruebas de caracterización.



Figura 2. 5. Sistema de destilación ASTM.

2.6 Pruebas de caracterización

Para la identificación del comportamiento del tipo de combustible alternativo obtenido se realiza una caracterización tanto para el producto líquido de la pirolisis y el destilado del mismo.

Las pruebas realizadas son:

- Grados API
- Gravedad específica
- Viscosidad Cinemática a 40°C
- Poder calorífico
- Carbón Residual Conradson.

- Punto de inflamación
- Índice de refracción
- Punto de fluidez
- Contenido de saturados, aromáticos y olefinas
- Contenido de Azufre
- Color ASTM
- Contenido de Agua y Sedimento

2.6.1 Grados API

Para la determinar el grado API de la muestra se sigue el procedimiento según la norma NTE INEN 2903. Primero se coloca la muestra en una probeta de 1 L, luego se introduce un hidrómetro y se espera a que se estabilice, se lee la escala del hidrómetro y se mide la temperatura, el valor del grado API que se observa se corrige a la temperatura de referencia mediante las tablas de medición de petróleo.



Figura 2. 6. Determinación de Gravedad API, Método de Hidrómetro.

2.6.2 Gravedad específica

Para efecto del cálculo de la gravedad específica se relaciona con los grados API denotado en la siguiente Ecuación 2.

$$API = \frac{141,5}{Sg} - 131,5$$

Ecuación 1. 2

Donde:

API= Grados API a 15,6°C

Sg= Gravedad específica

2.6.3 Viscosidad Cinemática a 40°C

Para determinar la viscosidad cinemática se realizó el procedimiento NTE INEN 0810, indicando que se debe medir el tiempo de un determinado volumen de líquido en que se demora en fluir por acción de la gravedad a través de un tubo capilar del viscosímetro a una temperatura constante de 40°C. Luego se multiplica la constante del viscosímetro por el tiempo para obtener el valor de la viscosidad.



Figura 2. 7. Viscosímetro Cinemático.

2.6.4 Poder calorífico

Para determinar el poder calorífico de los aceites combustibles se usa un calorímetro marca IKA C200, primero se pesa 1 gr de muestra directamente en el crisol de cuarzo, se introduce el crisol en el porta-crisol, luego se conecta un hilo de algodón y se sumerja

en la muestra, se desliza el adaptador de ignición en el recipiente de descomposición, se coloca el recipiente de descomposición en el recipiente interior del calorímetro C 200, después se vierte en el tanque 2 L de agua a una temperatura igual o menor a 20°C, luego se introduce el valor del peso de la muestra en el calorímetro, al final se cierra la tapa y se espera que el calorímetro muestre el valor del poder calorífico.



Figura 2. 8. Calorímetro IKA.

2.6.5 Carbón Residual Conradson.

De acuerdo con la NTE INEN 1491, se pesa una cantidad de muestra en un crisol de porcelana y se somete a una destilación destructiva, luego el residuo se somete a un calentamiento fijo y severo donde ocurren reacciones de desintegración y coquización, posteriormente dejando enfriar el crisol con el residuo carbonoso en un desecador y tomar el peso.



Figura 2. 9. Determinación de Carbón Conradson.

2.6.6 Punto de inflamación

El análisis de punto de inflamación se realiza de acuerdo con la norma NTE INEN 0808, que consiste en llenar de muestra la copa de Cleveland hasta que el menisco llegue a la línea marcada en él, se procede a calentar la muestra a una velocidad de 2°C por minuto mientras se le acerca una llama con movimiento uniforme y continuo, se registra como punto de inflamación la temperatura observada en el momento que aparece una llamarada en la muestra.



Figura 2. 10. Determinación de Punto de Inflamación.

2.6.7 Índice de refracción

La prueba del índice de refracción se realiza en un refractómetro, limpiando con solvente (tolueno, etanol), la superficie del espejo, se agrega la muestra y se acerca la luz, ajustando los límites para obtener la lectura del índice.



Figura 2. 11. Refractómetro.

2.6.8 Punto de fluidez

Para determinar del punto de fluidez, se introduce la muestra en un tubo de ensayo hasta una altura de 5 cm, se coloca un termómetro insertado en un tapón de caucho cuidando que no se toquen las paredes el tubo ni el fondo, luego se sumerge en una mezcla frigorífica (acetona/hielo seco), para bajar la temperatura de la muestra, sacar el tubo cada 3 grados e inclinarlo hasta 3 segundos, registrar como punto de fluidez a la temperatura en que la muestra deja de moverse al inclinarse el tubo de ensayo.



Figura 2. 12. Determinación de Punto de Fluidez.

2.6.9 Contenido de saturados, aromáticos y olefinas

Para llevar a cabo la determinación de contenido de saturados, olefinas y aromáticos se procedió a seguir las indicaciones de la

Norma ASTM D1319, mediante una columna de cromatografía la cual realiza un proceso de adsorción mediante un indicador fluorescente, silica gel que actúa como fase estacionaria y alcohol como fase móvil que arrastra a la muestra con aire a presión para que haga contacto con el indicador, midiendo al final la distancias de los indicadores como se muestra en la Figura 25, el anillo rojo indica compuesto saturados, el color entre azul y amarillo fluorescente compuestos de olefinas.

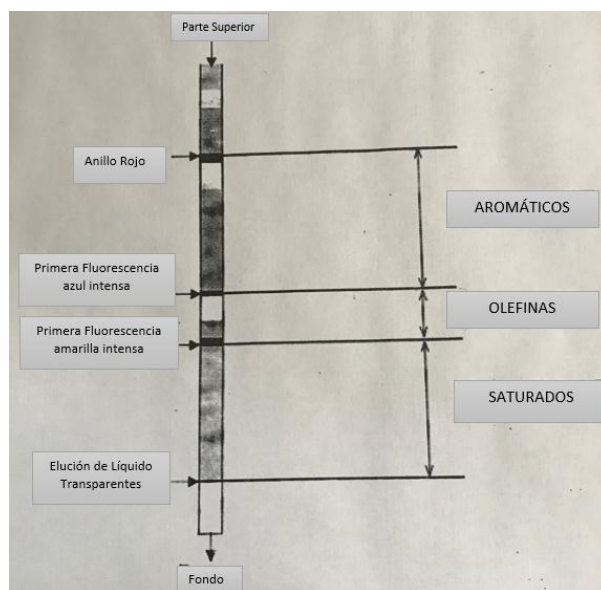


Figura 2. 13. Identificación de compuestos saturados, olefinas y saturados.

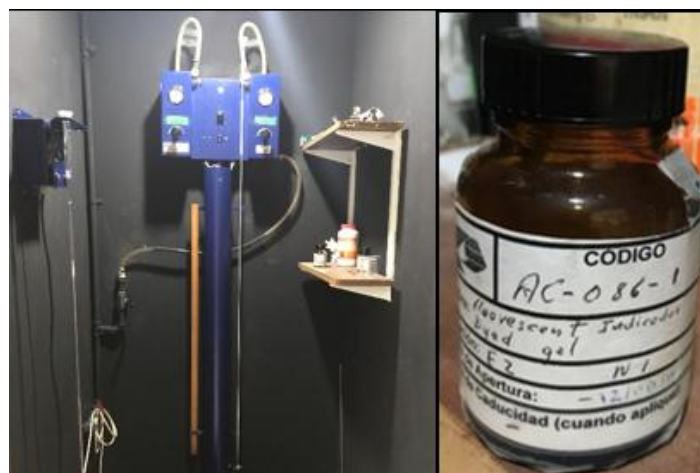


Figura 2. 14. Columna de Cromatografía e Indicador Fluorescente.

2.6.10 Contenido de Azufre

Para la detectar el contenido de azufre se utilizó un analizador de azufre que realiza su función mediante la fluorescencia de rayos X, cumpliendo con lo establecido en la norma ASTM D4294.



Figura 2. 15. Analizador de azufre.

2.6.11 Color ASTM

Se determinó el color mediante la norma ASTM D1500, donde se coloca la muestra en un recipiente de vidrio para ser analizado con dos muestras estándar colocadas en el Colorímetro.



Figura 2. 16. Analizador de Color ASTM.

2.6.12 Contenido de Agua y Sedimento

El contenido de agua y sedimento se determina de acuerdo con la norma NTE INEN 1494, se debe colocar 50 ml de la muestra con 50 ml de solvente en dos tubos de centrifuga. Ambos deberán de contener el mismo volumen colocar un tapón y mezclar, introducirlos en la centrifuga a 140 °F durante 15 minutos a 1300rpm.



Figura 2. 17. Equipo de Centrifugación.

2.7 Validación de datos por análisis estadístico ANOVA

Los valores obtenidos de las diferentes pruebas realizadas para el producto líquido y las destilaciones se someten a un análisis estadístico en Excel 2016 usando ANOVA.

La herramienta estadística ANOVA se utiliza para determinar si existen diferencias significativas de los valores de las pruebas realizadas entre el producto líquido de la pirólisis y sus respectivas destilaciones. ANOVA requiere el cumplimiento los siguientes supuestos:

- Las distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor son normales.
- Las muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- Las poblaciones tienen todas igual varianza.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

3. Resultados

3.1 Muestreo de desechos en el campus universitario

El muestreo de los desechos recolectados en las instalaciones de la Universidad se detalla en la siguiente tabla que indica la masa de desechos de 10 fundas por cada día.

Tabla 16. Muestreo de desechos sólidos generados en el campus

# Fundas	<i>Masa de desecho por funda (Kg)</i>					Promedio	σ
	Días de muestreo						
	1	2	3	4	5		
1	3,2	4,1	3,2	3,6	4,5	3,7	1
2	3,6	5,5	4,5	5,9	4,1	4,7	1
3	2,3	5	3,2	4,1	2,7	3,5	1
4	6,4	3,6	3,6	4,5	3,6	4,3	1
5	2,7	2,7	5,1	5,4	4,5	4,1	1
6	3,2	3,6	5,5	4,1	3,6	4,0	1
7	4,8	4,1	3,2	5	5	4,4	1
8	2,7	4,5	4,1	4,1	4,9	4,1	1
9	4,5	3,2	3,6	5	3,2	3,9	1
10	3,6	2,3	4,5	3,2	3,6	3,4	1
Masa total de muestreo	37,0	38,6	40,5	44,9	39,7	40,1	3
Masa promedio	3,7	3,9	4,1	4,5	4,0	4,0	0

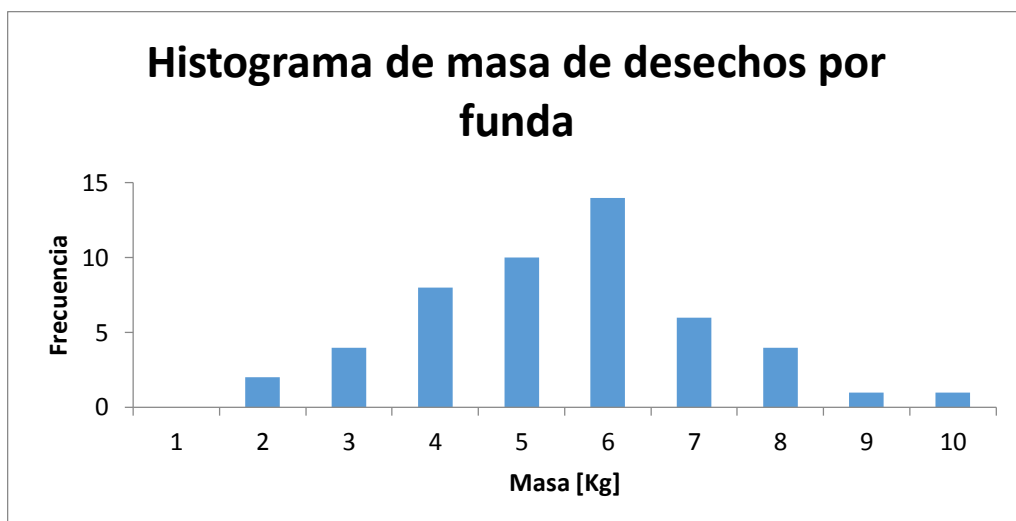


Gráfico 5. Distribución de muestras recolectadas.

A si mismo se estudió la variabilidad de la masa de desecho por funda, presentándolo en un histograma mostrado en el Gráfico 5, estableciendo variaciones de 1Kg/Funda.

El Gráfico 6, muestra la variación de los desechos generados por día de muestreo se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Desechos generados por día

	Dia					Promedio	σ
	1	2	3	4	5		
Total de Fundas de Basura	129	125	134	130	132	130	4
Masa promedio $\frac{kg}{funda}$	3,7	3,9	4,1	4,5	4,0	4,04	0,3
Masa Total de basura $\frac{kg}{dia}$	477	483	543	584	524	522	44

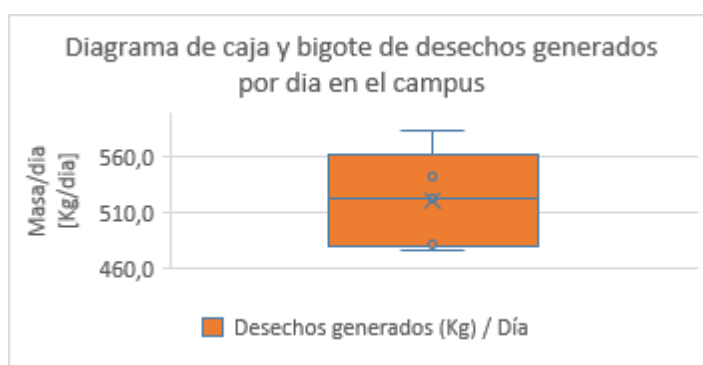


Gráfico 6. Desechos generados por día en el campus

En la tabla 18, se muestran los porcentajes de desecho plástico presente en los residuos del campus, las variaciones de los porcentajes son mostrados en el Gráfico 7.

$$\% = \frac{M_{plásticos}}{M_{desechos}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Tabla 18. Cantidad de plástico en los desechos.

Muestreo	Dia					Promedio	σ
	1	2	3	4	5		
Masa de desechos (Kg)	37,0	38,6	40,5	44,9	39,7	40,1	3
Material plástico (Kg)	7,2	5,4	6,1	6,8	6,7	6,4	0,7
Porcentaje de material plástico (%)	19,5	14,0	15,1	15,1	16,9	16,1	2,2

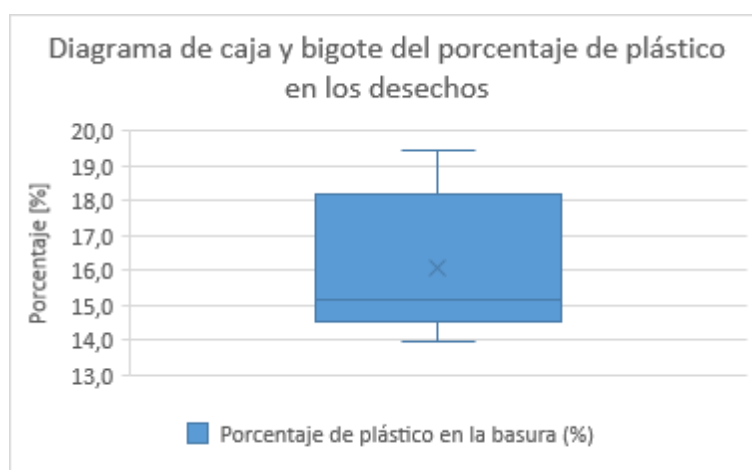


Gráfico 7. Plástico en los desechos del campus

3.2 Identificación de plásticos en laboratorio

3.2.1 Ensayo a la llama

Para la identificación de distintos plásticos que no tienen el número de clasificación según la SPI, se procedió a analizar el comportamiento frente a la llama de estos plásticos, anotados en la Tabla 19

Tabla 19. Resultados de ensayo en la llama.

Comportamiento \ plásticos	Sorbetes	Cuchara	Tapas de botellas	Envase leche	Vasos de cola	Funda de comida rápida	Envase de torta	Envase Avena	Envases espumados	Envase de Gelatina
Arde en llama	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Continúa ardiendo después de retirarla	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Deja de arder después de retirarla										
Llama azul con extremo amarillo	X	X	X	X	X	X				
Llama amarilla con humos densos con copos de hollín							X	X	X	X
Llama amarilla difícil de encender										
Funde y gotea	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gotas arden	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Olor a vela	X	X	X	X	X	X				
Olor acre										
Olor a gas de ciudad							X	X	X	X
Tipo de plástico	PP	PP	PE	PP	PP	PE	PS	PS	PS	PS

Las masas por tipo de plástico y el total de plástico desechado d se detalla en la Tabla 20

Tabla 20. Material plástico diario del muestreo.

Tipo de polímero	Masa de cada tipo de plásticos (Kg)					Promedio	σ
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5		
PS	0,7	0,5	0,8	0,6	0,9	0,7	0,2
PP	1,6	1	1,1	1,3	1,4	1,3	0,2
PEBD	0,7	0,9	1	1,2	0,8	0,9	0,2
PEAD	1,4	1,2	0,9	1,6	1,3	1,3	0,3
PET	2,8	1,8	2,3	2,1	2,3	2,3	0,4

La distribución del porcentaje por cada tipo de plástico calculado se muestra en el Gráfico 8.

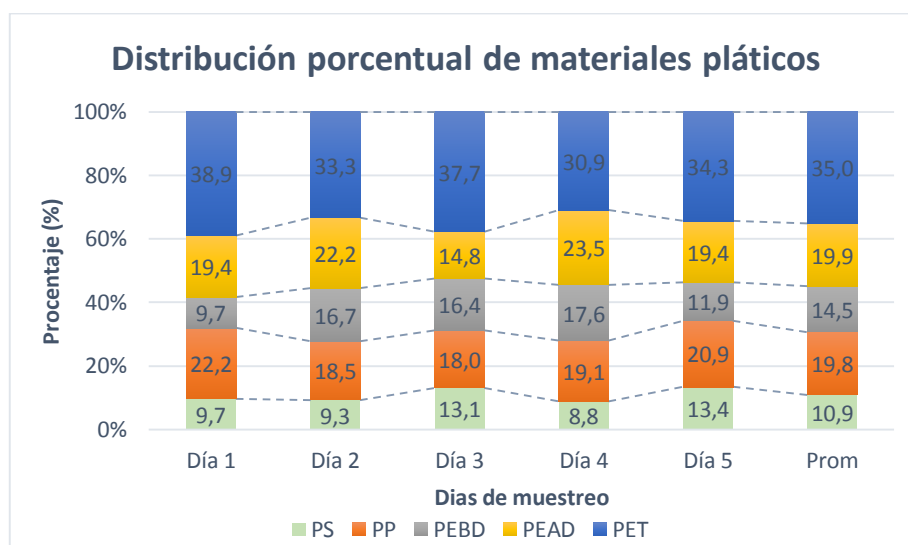


Gráfico 8. Distribución porcentual de materiales de plástico.

El Gráfico 9, muestra la variabilidad de los porcentajes por tipo de plástico.

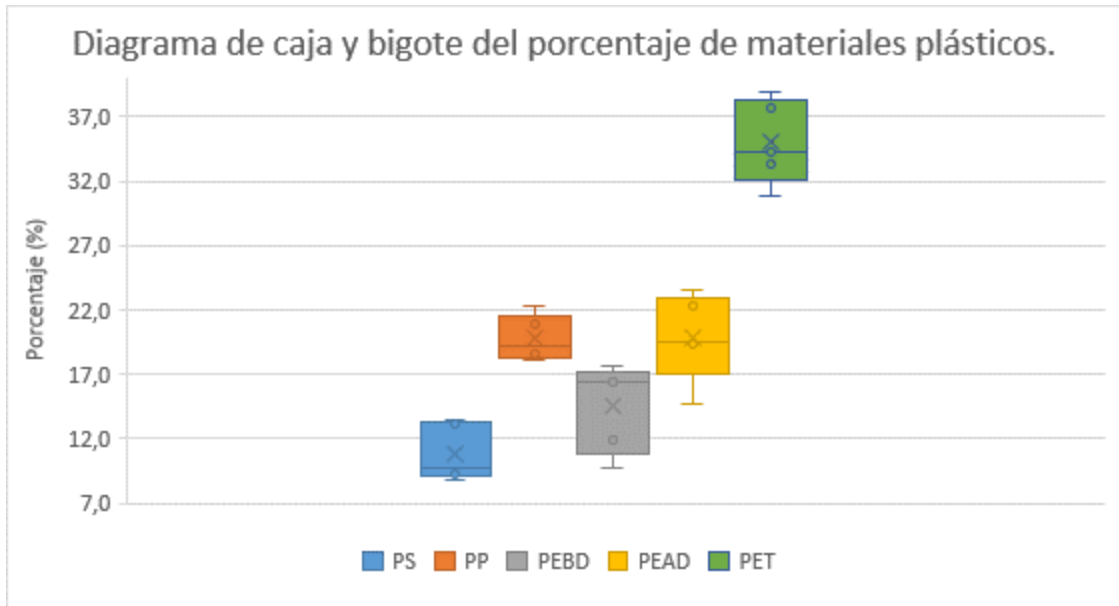


Gráfico 9. Porcentaje de materiales plásticos

La Tabla 21 detalla el promedio diario de cada tipo de plástico desechado a partir de las masas registradas por día de muestreo, usando la siguiente ecuación

$$\frac{M_{plástico}}{día} = \%_{plástico} * \frac{M_{desecho}}{día} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Tabla 21. Estimación de material plásticos desechados diarios.

Tipo de plástico	Masa de desecho diario por cada tipo de polímero (Kg)					Promedio	σ
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5		
PS	9,0	6,3	10,7	7,8	11,9	9,1	2,2
PP	20,6	12,5	14,7	16,9	18,5	16,6	3,2
PEBD	9,0	11,3	13,4	15,6	10,6	12	2,6
PEAD	18,1	15,0	12,1	20,8	17,2	16,6	3,3
PET	36,1	22,5	30,8	27,3	30,4	29,4	5

El material plástico que sería desechado mensualmente se detalla en la Tabla 22, así mismo la producción per-cápita mensual de desechos plástico, con un aproximado de 12000 habitantes en el campus.

Tabla 22. Desechos plásticos generados.

Desechos plásticos generados		
Tipo de plástico	Mensual [Kg]	Per-cápita [$\frac{Kg}{Hab-mes}$]
PS	182,7	0,02
PP	333,0	0,03
PEBD	239,4	0,02
PEAD	332,3	0,03
PET	588,4	0,05
Total	1675,8	0,14

3.3 Proceso de pirólisis de PS reciclado

Para establecer los parámetros del proceso a escala piloto se realizan varias pruebas a diferentes temperaturas donde se identifica cual es de mayor rendimiento.

3.3.1 Determinación de los parámetros de pirólisis a nivel de laboratorio.

Los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio a 300 °C, 350°C y 400°C se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 23. Datos a 300 °C.

Propiedades	UNDS	Ensayos			PROMEDIO	σ
		1	2	3		
Temperatura de Operación	°C	300	300	300	300	0.0
Masa Inicial	G	100	100	100	100	0.0
Producto Líquido	MI	83	86	81	83.3	2.5
Densidad del Líquido	$\frac{g}{ml}$	0.905	0.903	0.905	0.90	0.0
Producto Líquido	G	75,1	77,7	73,3	75,4	2.2
Producto Sólido	G	10,5	13,5	13,5	12,5	1.7
Producto Gaseoso	G	14,4	8,8	13,2	12,1	2.9

Tabla 24. Datos a 350 °C.

Propiedades	UNDS	Ensayos			PROMEDIO	σ
		1	2	3		
Temperatura de operación	°C	350	350	350	350	0.0
Masa Inicial	G	100	100	100	100	0.0
Producto Líquido	ml	104	106	101	103.7	2.5
Densidad del Líquido	$\frac{g}{ml}$	0.907	0.906	0.909	0.91	0.0
Producto Líquido	G	94,3	96,0	91,8	94,1	2.1
Producto Sólido	G	3,5	2,1	4,5	3,4	1.2
Producto Gaseoso	G	2,2	1,9	3,7	2,6	1.0

Tabla 25. Datos a 400 °C.

Propiedades	UNDS	Ensayos			PROMEDIO	σ
		1	2	3		
Temperatura de operación	°C	400	400	400	400	0.0
Masa Inicial	G	100	100	100	100	0.0
Producto Líquido	ml	106	107	103	105.3	2.1
Densidad del Líquido	$\frac{g}{ml}$	0.908	0.911	0.91	0.91	0.0
Producto Líquido	G	96,2	97,5	93,7	95,8	1,9
Producto Sólido	G	3,5	2,0	4,0	3,1	1,0
Producto Gaseoso	G	0,3	0,5	2,3	1,0	1,1

Los diferentes rendimientos obtenidos se representan en el Gráfico 10.

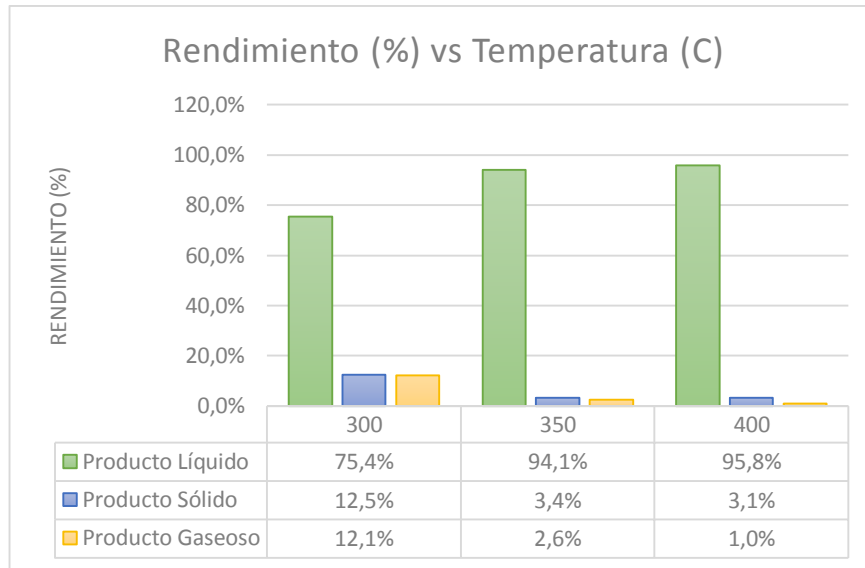


Gráfico 10. Rendimiento a diferentes temperaturas

En la Tabla 26, se presentan los datos detallados de cada proceso realizado de pirólisis para luego efectuarse la caracterización general del proceso con los datos promedios obtenidos.

Tabla 26. Condiciones del proceso de pirólisis

Propiedades	Und.	Dia							Promedio	σ
		1	2	3	4	5	6	7		
Temperatura Inicial	°C	27	27	27	27	27	27	27	27	0
Masa Inicial de PS	g	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0
Tiempo de Primera gota	Min	11,01	10,41	10,49	10,52	10,11	10,34	11,08	11	0,4
Temperatura de Primera Gota	°C	111	123	122	111	116	119	125	118	6
Tiempo que alcanza la T=350°C	Min	35,08	32,55	33,29	34,01	30,11	34,28	31,42	33	2
Tiempo Final de Reacción	Min	57,11	59,56	57,02	54,25	52,57	55,36	53,41	55,6	2
Masa Final de Producto Líquido	g	969,93	959,12	976,76	961,24	970,55	973,13	968,41	968,45	6
Masa Final de Producto Sólido	g	14,93	17,9	12,41	14,9	13,56	12,43	14,2	14,33	2
Masa Final de Producto Gaseoso	g	15,1	23	10,8	23,9	15,9	14,44	17,39	17,22	5
Velocidad de Calentamiento	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$	2	2.2	2.18	2.29	2.33	2.11	2,15	2,08	0,1

Las curvas representadas en el Gráfico 11, detallan la distribución de temperatura durante el tiempo de reacción que tuvo cada proceso de pirólisis.

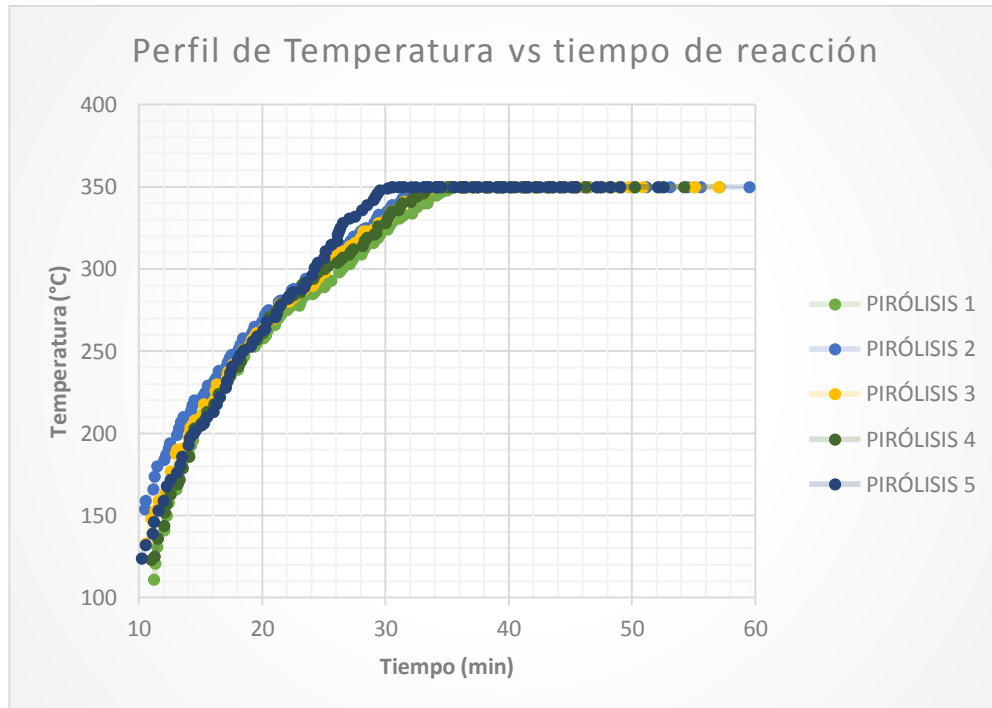


Gráfico 11. Perfil de temperatura en los ensayos de Pirólisis vs tiempo de reacción.

En el Gráfico 11, se muestran los resultados de la distribución de productos obtenidos del proceso de pirólisis los cuales se representan según su balance de masa (% masa).

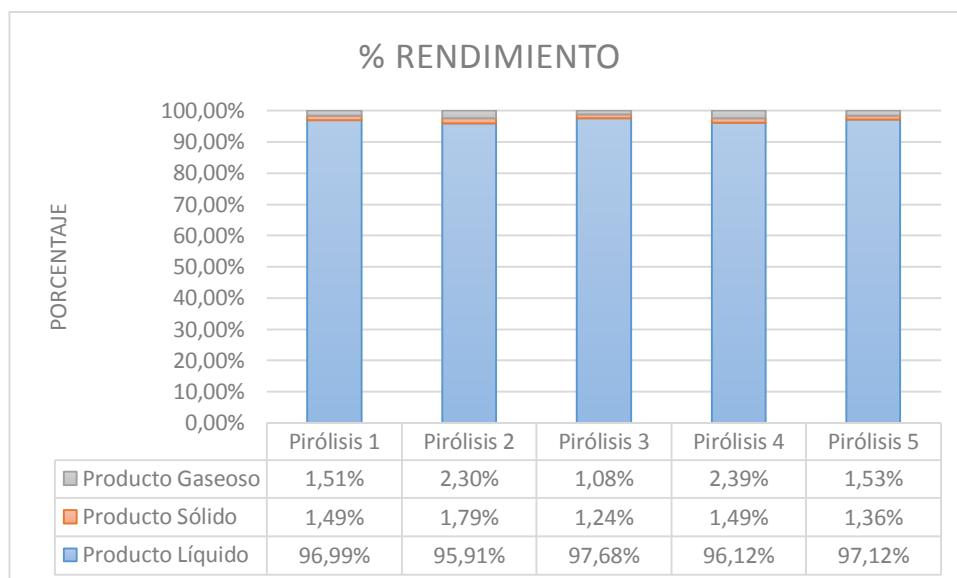


Gráfico 12. Eficiencias de cada pirólisis.

Tabla 27. Rendimiento de los productos.

Producto	Rendimiento (%)
Producto Líquido	95-98 %
Producto Sólido	1 – 2 %
Producto Gaseoso	1 –3 %

La estimación promedio de la cantidad de combustible que podría ser generado por día y por mes, aprovechando la totalidad del material plástico de PS desechado en el campus, se detallada en la Tabla 28.

Tabla 28. Estimación de combustible generado del PS reciclado.

Producción de Combustible alternativo [L]		
Tipo de plástico	Diario	Mensual
PS	9,5	190

3.4 Destilación del combustible alternativo

Tabla 29. Datos de destilación del producto.

Propiedades	Und.	Destilaciones										Promedio	σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Porcentaje Recuperado	%	89	83	85	80	87	81	85	82	83	80	84	3,0
Porcentaje de Residuo	%	11	16	15	19	13	18,5	15	18	16,5	19	16	2,7
Porcentaje de Pérdida	%	0	1	0	1	0	0,5	0	0	0,5	1	0,4	0,5
Destilación													
P.I.E.	°C	132	130	132	131	130	132	136	133	130	131	132	1,8
10%	°C	138	139	138	139	139	138	138	138	139	138	138	0,5
50%	°C	146	146	146	146	146	145	146	146	147	146	146	0,5
Final	°C	290	260	265	264	280	269	279	270	280	264	272	9,6

La tabla 30 detalla las 5 corridas de la segunda destilación realizadas al producto de la primera destilación del aceite pirolítico.

Tabla 30. Datos de la segunda destilación

Propiedades	Und.	Destilaciones					Promedio	σ
		1	2	3	4	5		
Porcentaje Recuperado	%	90	88	91	90	89	89,6	1
Porcentaje de Residuo	%	10	11	9	10	10	10	1
Porcentaje de Pérdida	%	0	1	0	0	1	0,4	1
Destilación								
P.I.E.	°C	134	131	129	130	132	131,2	2
10%	°C	138	136	138	139	136	137,4	1
50%	°C	145	146	146	146	145	145,6	1
Final	°C	191	188	191	191	187	189,6	2

El Gráfico 13 muestra la curva de la destilación ASTM del producto líquido, comparándolo con las curvas del Diesel y la gasolina.

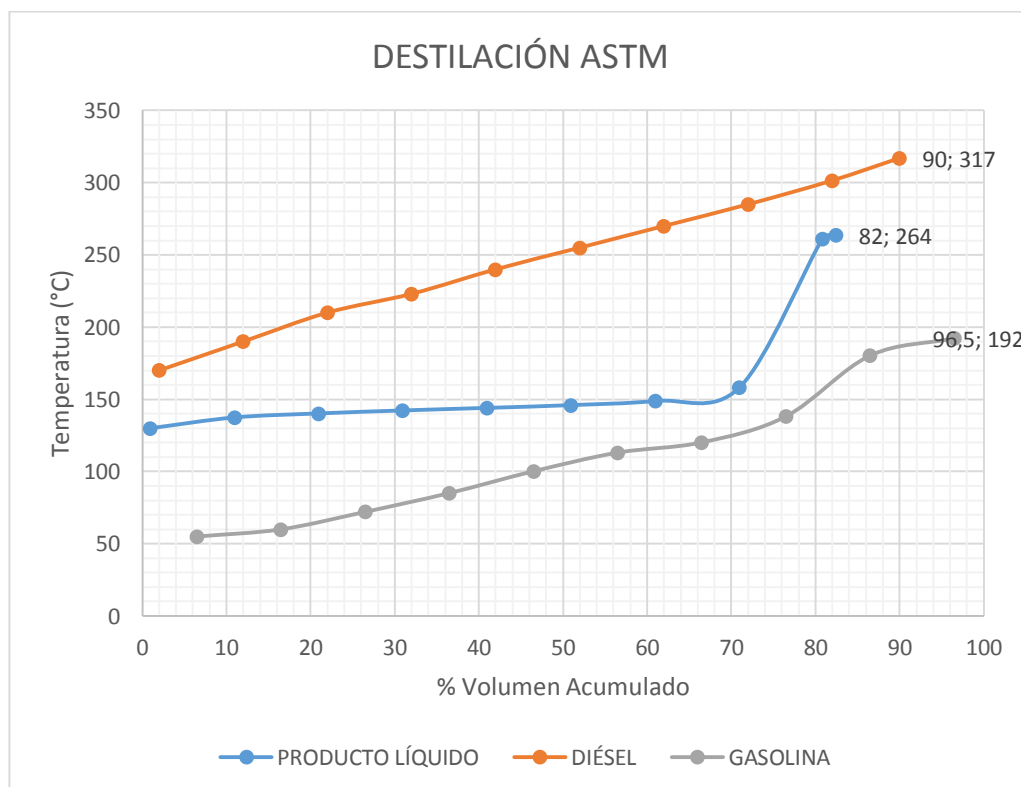


Gráfico 13. Comparación de la destilación ASTM.

3.5 Ensayos de caracterización

En la tabla 31 se detalla el cálculo de la gravedad API y la gravedad específica corregidas de cada prueba de pirólisis.

Tabla 31. Gravedad API y gravedad específica del producto.

Propiedades	Pirólisis					Promedio	σ
	1	2	3	4	5		
Gravedad API (28°C)	22	22.3	22.3	22.5	22.4	22.3	0.2
Gravedad API (15.6°C)	20.66	20.9	20.9	21.1	21	20.91	0.2
Gravedad Específica (15.6°C)	0.930	0.928	0.928	0.927	0.928	0.928	0.0

En la Tabla 32. Se resumen los porcentajes de carbón Conradson tomados para las 2 muestras analizadas con 5 réplicas del ensayo y la variabilidad de los valores entre el producto líquido y el primer destilado se muestra en el Gráfico 13.

Tabla 32. Resultados de pruebas de porcentaje de carbón Conradson

Residuo de Carbón Conradson [%m/m]		
Pruebas	Producto líquido	Destilado 1
1	0,55	0,02
2	0,56	0,01
3	0,54	0,02
4	0,55	0,01
5	0,53	0,01
Promedio	0,55	0,01
σ	0,01	0,005

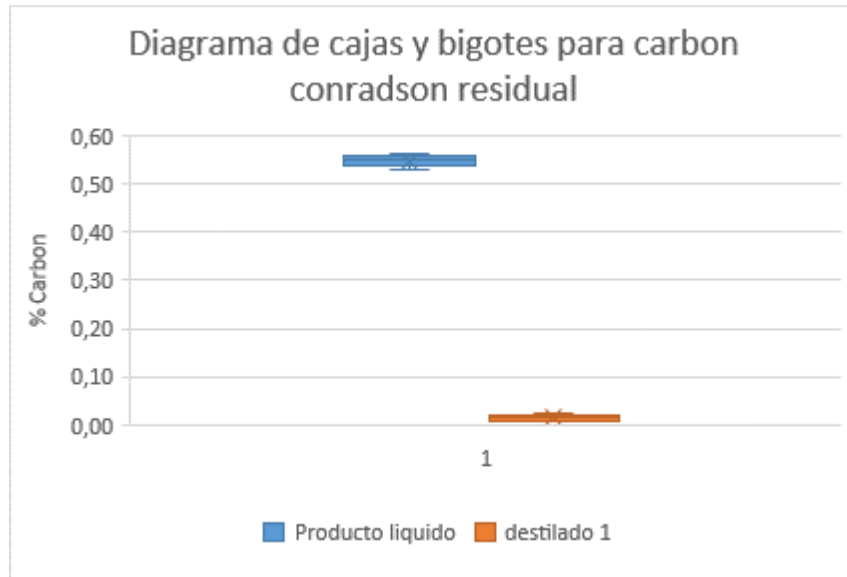


Gráfico 14. Residuo de carbón Conradson.

En el Gráfico 15, se comparan la variabilidad de los valores, que están detallados en la Tabla 33, del producto líquido y sus respectivas destilaciones.

Tabla 33. Resultados de pruebas de poder calorífico.

Poder Calorífico [J/g]			
Pruebas	Producto líquido	Destilado 1	Destilado 2
1	39955	40276	40175
2	40101	39653	40579
3	40294	39824	40274
4	40117	40374	40623
5	40329	40541	39836
Promedio	40159	40134	40297
σ	150	380	320

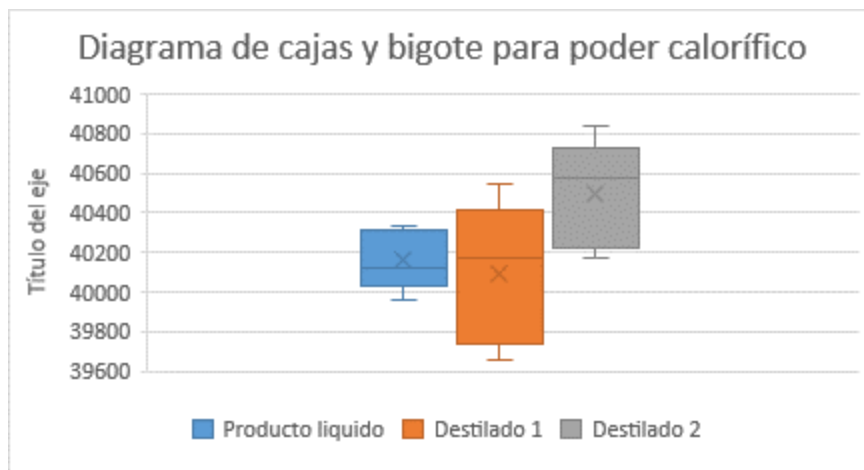


Gráfico 15. Poder calorífico

Los resultados de las pruebas del punto de fluidez son detallados en la Tabla 34, y la comparación de la variabilidad entre el producto líquido y el primer destilado se muestran en el Gráfico 16.

Tabla 34. Resultados de pruebas de punto de fluidez.

Punto de Fluidez [°C]		
Pruebas	Producto líquido	Destilado 1
1	-59	-46
2	-57	-47
3	-58	-51
4	-58	-48
5	-58	-48
Promedio	-58	-48
σ	1	2

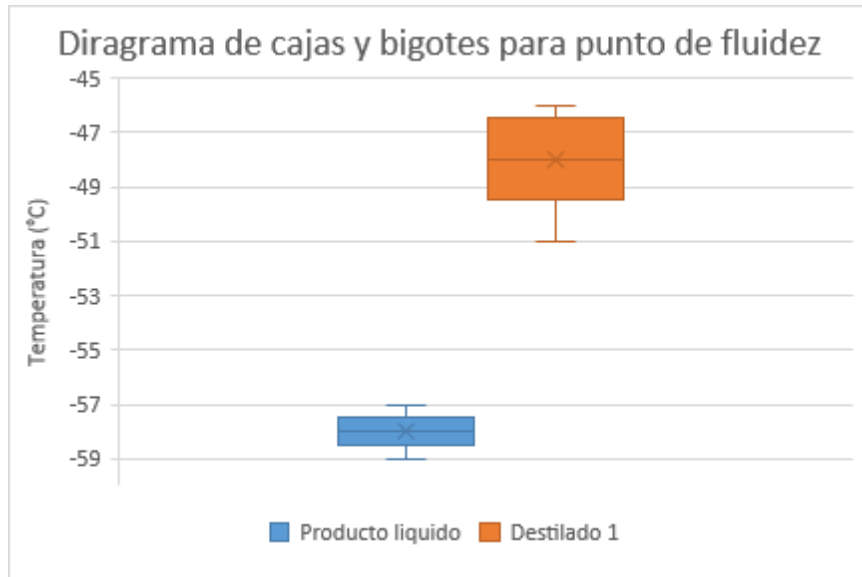


Gráfico 16. Punto de fluidez.

Los valores detallados y la variabilidad de la viscosidad cinemática medida a 40°C se muestran en la Tabla 35 y el Gráfico 17 respectivamente.

Tabla 35. Resultados de la viscosidad cinemática.

Viscosidad cinemática a 40°C [cSt]			
Pruebas	Producto liquido	Destilado 1	Destilado 2
1	0,939	0,738	0,671
2	0,940	0,748	0,672
3	0,949	0,742	0,668
4	0,954	0,739	0,673
5	0,959	0,738	0,669
Promedio	0,948	0,741	0,671
σ	0,009	0,004	0,002

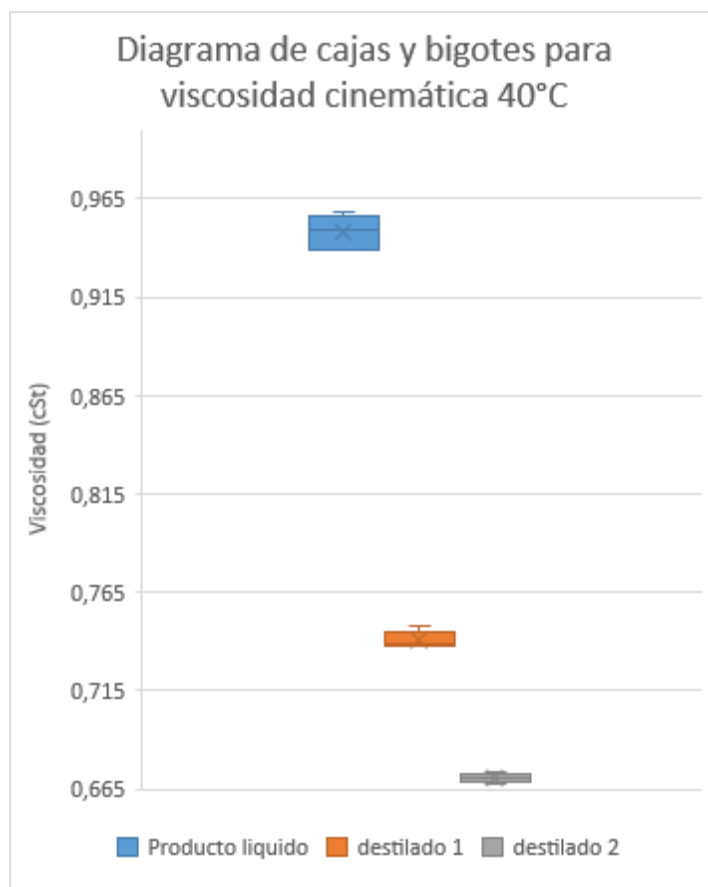


Gráfico 17. Viscosidad cinemática

Los datos que se obtuvieron de los ensayos del punto de inflamación se detallan en la siguiente tabla; la variabilidad entre el producto líquido y las respectivas destilaciones se comparan en el Gráfico 18.

Tabla 36. Resultado de pruebas de punto de inflamación.

Punto de inflamación [°C]			
Pruebas	Producto líquido	Destilado 1	Destilado 2
1	34	36	33
2	37	35	32
3	39	34	31
4	37	35	33
5	36	34	33
Promedio	37	35	32
σ	2	1	1

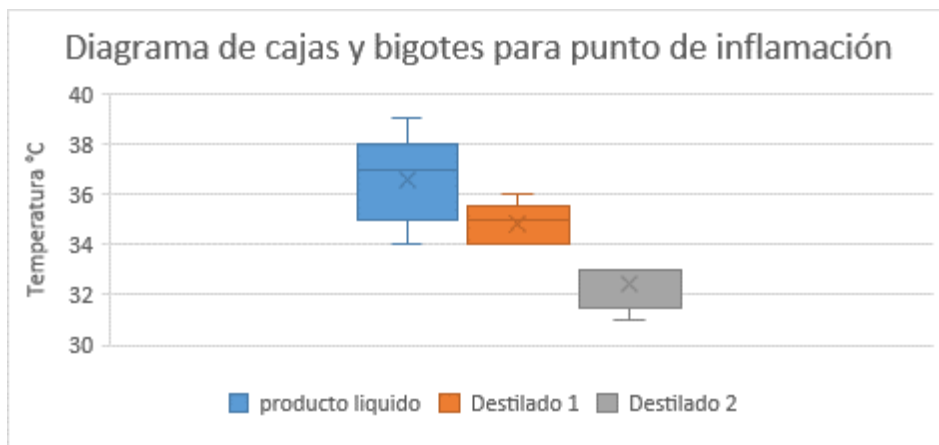


Gráfico 18. Punto de inflamación.

La Tabla 37 muestra los valores del índice de refracción del producto líquido y sus destilaciones.

Tabla 37. Resultados de pruebas de índice de refracción

Índice de refracción			
Pruebas	Producto líquido	Destilado 1	Destilado 2
1	1,5525	1,5385	1,5335
2	1,5530	1,5385	1,5340
3	1,5540	1,5390	1,5350
4	1,5485	1,5405	1,5340
5	1,5525	1,5380	1,5345
Promedio	1,5521	1,5389	1,5342
σ	0,002	0,001	0,001

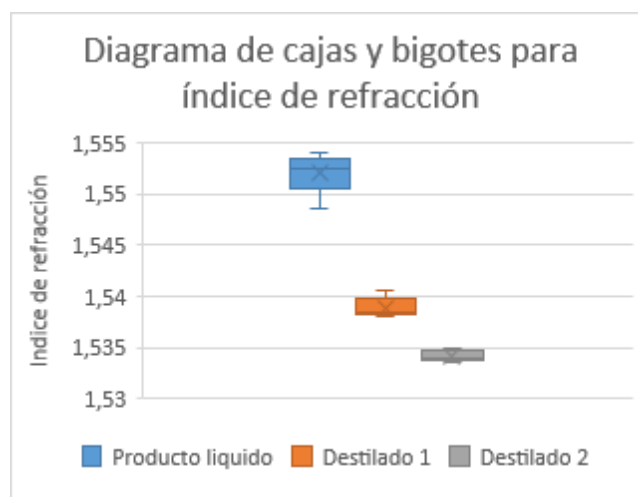


Gráfico 19. Índice de refracción

La tabla 38 compara los resultados obtenidos del producto líquido y sus destilaciones con los datos de gasolina y diésel establecidos por la normativa ecuatoriana INEN.

Peso molecular de destilado

La siguiente ecuación se usa para el cálculo del peso molecular

$$PM = 20.486 * Tb^{1.26007} * Sg^{4.9308} * e^{(0.0001165*Tb-7.78712*Sg+0.0011582*Tb*Sg)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$PM = 114 \frac{g}{mol}$$

Contenido de aromáticos en la mezcla destilado diésel

Se realiza un balance para obtener un 33% de aromáticos, después se calcula la fracción volumétrica que posee la mezcla.

Punto de inflamación de mezcla producto-diésel

Para este cálculo se usó las siguientes ecuaciones de índice de punto de inflamación

$$\log_{10} BI_F = -6.1188 + \frac{2414}{Tf - 42.6} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$BI_B = \sum x_{vi} * BI_i \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

Tf = punto de inflamación

BI_F = índice de punto de inflamación individual

BI_B = índice de punto de inflamación de mezcla

Tabla 38. Propiedades de mezcla producto-diésel

		Destilado	Diésel	Mezcla
% Aromático	%v/v	99.6	26	30
Fracción volumétrica		0.1	0.9	
Punto de inflamación	°C	34	64*	56,3

*Refinería La Libertad

Tabla 39. Comparación de productos.

Comparación de productos obtenidos con diferentes combustibles				
Propiedades	UNIDADES	Producto líquido	Destilado 1	Destilado 2
% Carbón Conradson	% masa	0,55	0,01	-
Punto de fluidez	°C	-58	-48	-
Poder Calorífico	J/g	40159	40094	40497
Viscosidad	cSt	0,95	0,74	0,67
Punto de inflamación	°C	36,60	34,80	32,4
Índice de refracción		1,55	1,54	1,53
Gravedad API (15,6°C)		20,8	24,5	25,6
Gravedad Especifica		0,93	0,91	0,90
Contenido de Aromáticos	% v/v	-	99,70	99,70
Contenido de Oleofinas	% v/v	-	0,30	0,30
Color ASTM	unidades ASTM	-	1,50	<0,5
Contenido de Azufre	Ppm	-	8,8	8,93
Destilación				
PIE	°C	131	134	
10%	°C	139	138	
50%	°C	146	144	
90%	°C	289	191	
Punto final	°C	290	200	
Contenido de agua y sedimento	% v/v	<0,05	<0,05	

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Muestreo de los desechos generados en el campus universitario

El muestreo realizado en el centro de acopio recolecto aproximadamente $40.1 \frac{kg}{día}$. Usando un histograma de los pesos de las fundas de desecho se observa que las masas de las fundas están en mayor parte en un rango de 3,5 a $4 \frac{kg}{funda}$. Se estima que la universidad genera alrededor de $521,8 \frac{kg}{día}$ de desechos sólidos, donde el 16,1% son materiales plásticos, es decir $83,8 \frac{kg}{día}$.

4.2 Identificación de los desechos plásticos

De acuerdo con el comportamiento frente a la llama y al uso común se identifica que los sorbetes, cucharas y vasos de cola son fabricados de PP y que los envases de lácteos, fundas de comida son hechos de PE. Los productos elaborados de PS son los envases de torta avena y gelatina, al igual que contenedores de comida espumados.

4.3 Clasificación de los desechos plásticos

Entre los materiales plásticos que más se desechan, el PET ocupa el primer lugar con un 35%, seguido de PEAD y PP con 20%, en tercero el PP con 14% y al final el PS con 10%.

4.4 Proceso de pirólisis

Pruebas de pirólisis a nivel de laboratorio

Se comparan las eficiencias de producción a diferentes temperaturas; la menor de las eficiencias es a 300°C con un 75,4% mientras que a 350 °C y 400°C alcanzaron los 94 y 96% respectivamente, indicando que la temperatura de trabajo optima es de 350°C.

Pruebas a escala piloto

El tiempo de reacción estimado es de 1 h. El reactor calienta el material plástico de 27 a 350°C en 30 minutos, donde se observa que la primera gota de producto cae a una temperatura de 120 °C en los primeros 11 min. La cantidad obtenida de producto varía entre 0,95-0,98 kg estableciendo que la eficiencia del proceso está entre 95-98%. El Volumen de producto es de 1 L con una gravedad API de 20,9 y una gravedad específica de 0,928.

Si se aprovechara todo el PS desechado, se generaría $9,1 \frac{L}{\text{día}}$ de combustible.

4.5 Destilación del producto líquido.

Las características de la destilación ASTM del producto indican que el punto inicial de ebullición es de 132 °C, observando que la temperatura que cae la primera gota y la temperatura final de destilación es de $131 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $272 \pm 13 \text{ } ^\circ\text{C}$ respectivamente; la eficiencia del destilado es $85 \pm 3,5 \%$ con un $15 \pm 3 \%$ de residuos.

Las temperaturas de las fracciones del 10% es de $138 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ y 50% es de 146 °C.

La comparación de las curvas de destilación ASTM del producto con el diésel y la gasolina se observa las fracciones del producto tiene una elevación de temperatura baja, de manera constante teniendo una elevación de temperatura al final por la repolimerización de las cadenas debido a las altas temperaturas.

4.6 Ensayos de caracterización

Gravedad API y Gravedad específica

El ensayo de la gravedad API indica que el producto líquido pertenece a un crudo pesado, el primer y segundo destilado pertenecen a un crudo liviano, según la Tabla 14, con una gravedad API de 20.9, 24.5 y 25.6 respectivamente, y sus valores son menores a la gasolina de gravedad

API mínimo de 56,46; a partir de los grados API se calcula la gravedad específica correspondiendo a 0.93, 0.91 y 0.9 para el producto líquido, primer y segundo destilado respectivamente.

Carbón residual Conradson

Los ensayos de residuo de carbón Conradson determinan que el producto líquido tiene mayor porcentaje en relación con el destilado 1, como se muestra en la tabla 12, el $0,55 \pm 0,01$ % corresponde al producto líquido mientras que el $0,01 \pm 0,005$ % al destilado.

Poder Calorífico

La prueba de poder calorífico para los tres productos indica que el producto líquido tiene un Cp de $40159 \pm 150 \frac{J}{g}$, el primer destilado tiene un Cp de $40134 \pm 380 \frac{J}{g}$ y el segundo destilado tiene un Cp de $40297 \pm 320 \frac{J}{g}$. El análisis ANOVA establece, con un factor p de 0.08, que no existe diferencias significativas entre los productos analizados.

Punto de Fluidez

El producto líquido tiene un punto de fluidez de -58 ± 1 °C y del destilado es de -48 ± 2 °C.

Viscosidad Cinemática

Las pruebas de viscosidad cinemática se le realizó tanto al producto líquido como a sus destilaciones, obteniendo una viscosidad de $0,948 \pm 0,009$ cSt para el producto líquido, $0,741 \pm 0,004$ cSt para el primer destilado y para el segundo la viscosidad es de $0,671 \pm 0,002$ cSt.

Punto de Inflamación

Los ensayos de punto de inflamación realizados establecieron que la temperatura para el producto líquido es de 37 ± 2 °C, para el primer destilado disminuye a 35 ± 1 °C, y para el segundo destilado corresponde a 32 ± 1 °C.

Índice de refracción

La prueba de índice de refracción determina que el productor líquido tiene $1,5521 \pm 0,002$ mientras que para el primer y segundo destilado es de $1,5389 \pm 0,001$ y $1,5342 \pm 0,001$ respectivamente, el análisis ANOVA determino un factor p de indicando que existe diferencia significativa entre los productos.

Color ASTM

El color ASTM determino que el primer destilado es de 1,5 unidades ASTM mientras que el segundo es menor a 0,5 unidades ASTM.

Contenido de aromático y olefinas

La prueba de contenido de aromáticos y Olefinas determinó que el 99,7% corresponde a aromáticos mientras que el porcentaje de Oleofinas es de 0,3%.

Contenido de Azufre

El contenido de azufre para el primer destilado es de 8,8 ppm y de 8,93 ppm para el segundo destilado que comparado con el Gráfico 4 se establece que los destilados tienen comportamiento de crudo dulce.

Contenido de agua y sedimentos

El contenido de agua y sedimentos para el producto líquido y las dos destilaciones indican que el porcentaje es menos a 0,05 %

La mezcla del destilado con diésel 2 estima que el porcentaje que cumpla las especificaciones es de 9,5% de destilado y 90,5% de diésel. Obteniendo un combustible con 56,3 C de punto de inflamación disminuyendo los peligros al almacenarlo.

Mezcla diésel-producto

La mezcla cumple con el rango del punto de inflamación del diésel con 56,3°C con 1 parte de producto y 9 partes de diésel.

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El análisis realizado determinó que el material plástico en menor proporción en los desechos generados en el campus es el PS con 10%, siendo el único que no se recicla de forma mecánica termina directamente en los vertederos de basura contribuyendo al deterioro del medio ambiente.

Aprovechando este recurso, se aplicó un proceso de degradación térmica, el cual generó un combustible con una eficiencia del 95 %, a una temperatura de 350 °C y presión de 1 atm, lo cual indica un rendimiento alto de producto líquido con buenas propiedades física tales como:

Bajo porcentaje de carbón residual Conradson, 0,055% para producto y 0,01% para el destilado, indicando que hay una baja formación de residuos carbonosos en la combustión.

El punto de fluidez de -58°C para el producto y -48°C para el destilado que beneficia el transporte y almacenado ya que no se ven afectadas las propiedades del combustible.

La baja viscosidad cinemática del destilado, 0,741 cSt, le da un buen potencial para el reemplazo de la nafta en la mezcla con crudos pesados, facilitando el transporte por tuberías de estos crudos.

El contenido de agua menor a 0,05% que favorece la baja formación de sales, evitando el deterioro de la calidad del combustible.

Bajo contenido de sedimento, menor al 0,05%, ayuda en la baja formación de incrustaciones, la cual evita el taponamiento de las tuberías en el transporte.

5.2 Recomendaciones

Realizar pruebas con motores con mezclas diésel-producto pirolítico a diferentes proporciones para establecer el mejor rendimiento del motor.

Hacer estudios de factibilidad económica de todo el proceso de producción del combustible, así como también la factibilidad económica de la mezcla diésel-producto

Desarrollar y evaluar métodos para la recuperación del monómero del poliestireno.

Investigar la posibilidad de mezclar el producto líquido con el asfalto ecuatoriano para aumentar la cantidad de aromáticos presentes.

6. REFERENCIA

- Aguado, J., Serrano, D., Escola, J., Garagorri, E., Rodríguez, J., Morselli, L., . . . Orsi, R. (2004). Feedstock recycling of agriculture plastic film wastes by catalytic cracking. En A. J. Serrano D.P., *Applied Catalysis B: Environmental* (págs. 257-265). Móstoles: ELSEVIER.
- Aguado, Serrano, & Clark, J. (1999). Feedstock Recycling of Plastic Wastes. En *Introduction, Classification of Polymers* (pág. 5). Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Alvarado, M. d. (2005). *Caracterización en frío de un reactor solar de lecho fluidizado para la pirólisis de la biomasa*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado el 7 de Agosto de 2007
- Aracil, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). En I. Aracil. Alicante: Universidad de Alicante.
- ASEPLAS. (2016). *Importaciones de las principales materias primas*. Guayaquil: ASPELAS.
- Association of Plastic Manufacturers. (16 de Diciembre de 2015). *Waste Plastic statistics*. Obtenido de Analysis of European Plastic Production, Demand and Waste:
http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics_the_facts_2015_final_30pages_14122015.pdf
- ASTM. (2000). *Pour Point*. West Conshohocken: ASTM. Obtenido de Standard Test Method for Pour Point of Crude Oils - ASTM D5853.
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure*. West Conshohocken: ASTM, Internacional. Recuperado el 28 de Julio de 2017, de <https://www.astm.org/Standards/D86.htm>
- BID. (6 de Junio de 2017). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion_de_la_gestion_de_residuos_solidos_en_America_Latina_y_el_Caribe.pdf?sequence=1

- Billmeyer, F. W. (2004). *CIENCIA DE LOS POLÍMEROS*. Barcelona: REVERTÉ S. A.
- Braun , D. (1990). *Métodos sencillos de Indentificación de plásticos*. Darmstadt: Hanser.
- Callister, W. (2007). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2* (Tercera ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Conseca. (1996). *Estudio de la pirolisis de residuos plasticos de polietileno y neumáticos usados*. Ingeniería Química. Alicante: Universidad de Alicante.
- El Comercio. (24 de Marzo de 2015). *Reciclaje de Envases PET*. Obtenido de Reciclaje en Hogares del Ecuador INEC : <http://www.elcomercio.com/tendencias/reciclaje-hogares-ecuador-crecimiento-inec.html>
- El Telegráfo. (10 de Agosto de 2013). *Reciclaje de PET*. Obtenido de El reciclaje reactiva la industria de plástico: <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/el-reciclaje-reactiva-la-industria-de-plasticos>
- Enright, C. (Octubre de 2013). *Punto de Inflamación*. Recuperado el 9 de Julio de 2017, de Determinación del Punto de Inflamación; Un nuevo manual de ASTM guía la práctica: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO13/infocus_sps13.html
- Espinoza, J. E., & Naranjo, T. M. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Fomento, M. d. (Diciembre de 2013). *CEDEXMATERIALES*. Obtenido de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html>
- Francis, R. (2017). *RECYCLING OF POLYMERS*. Chennai, India: Wiley-VCH.
- Gao, F. (2010). *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*. Christchurch: University of Canterbury.
- Gary, J., & Handwerk, G. (2003). *Refino de Petróleo: Tecnología y Economía*. Barcelona: Reverté.

- Greenpeace. (24 de agosto de 2016). *Greenpeace*. Obtenido de http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf
- Harper, C., & Petrie, E. (2003). Polystyrene. En C. Harper, & E. Petrie, *Plastic Materials And Processes* (págs. 444-446). Hoboken, Estados Unidos: Wiley Interscience.
- Hernández, M. d. (2007). *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Hidalgo, H. (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: Universidad Austral de Chile.
- Hopewell Jefferson, D. R. (2009). *Plastics recycling: challenges and opportunities*. *The National Center for Biotechnology Information*.
- Hulse, S. (2000). *Plastics Product Recycling*. Shawbury: Rapra Technology Limited.
- INEC . (27 de Enero de 2017). *Clasificación de Residuos Sólidos Ecuador*. Obtenido de Información Ambiental en Hogares: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Hogares/Hogares_2016/Principales_resultados_amb.pdf
- INEN . (Octubre de 2015). *Gravedad API*. Recuperado el 12 de Julio de 2017, de *Petróleo y productos Derivados de Petróleo. Determinación de la Densidad, densidad Relativa o Gravedad API. Método del Hidrómetro*: <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/n-te/n-te-inen-2903.pdf>
- INEN. (Enero de 2003). *Propiedades del Crudo y sus Derivados*. Recuperado el 4 de Julio de 2017, de *Derivados del Petróleo Productos Relacionados con el Petróleo y Afines. Definiciones*: <http://ia801906.us.archive.org/29/items/ec.n-te.2341.2003/ec.n-te.2341.2003.pdf>

- INEN. (Junio de 2012). *Clasificación de Plásticos*. Recuperado el 6 de Junio de 2017, de Disposición de Desechos Plásticos Post-Cosumo: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INENE-2634-Plasticos-post-consumo.pdf>
- INEN. (29 de Junio de 2014). *Materiales y Artículos Plásticos Destinados a estar en Contacto con los Alimentos*. Quito: INEN. Recuperado el 13 de Junio de 2017, de Collection and sorting of household rigid plastic packaging: <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/09/RTE-100.pdf>
- INEN. (Marzo de 2014). *Residuos plásticos*. Obtenido de Gestión Ambiental. Estandarización de colores para recipientes de depósito y almacenamiento temporal de residuos sólidos. Requisitos: <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/03/2841.pdf>
- Jaramillo, G., & Zapata, L. M. (2008). LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SU CLASIFICACIÓN. En *APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA* (pág. 29). Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Kaminsky, W., & Scheirs, J. (2006). *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Kates, E., & Luck, W. (2003). *Motores Diésel y Gas de Alta Compresión*. (Segunda ed.). Barcelona: Reverté.
- Lee, S., Speight, J., & Loyalka, S. (2007). *Handbook of Alternative Fuel Technologies* (Secunda ed.). Bosa Roca, Estados Unidos: CRC Press.
- Murata, K., Sato, K., & Sakata, Y. (2004). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. En S. a. Murata. Okayama: ELSEVIER.
- Murphy, J. (2001). Additives for Plastics Handbook. En J. Murphy. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=L5uWSRjY3Y0C&printsec=frontcover&dq=plastic+additives&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=plastic%20additives&f=false

- Pielichowski, k., & Njuguna, J. (2005). *Thermal Degradation of Polymeric Materials*. Shawbury: Rapra Technology Limited.
- Rajput, R. (2007). Processing of Plastics. En R. Rajput, *Manufacturing Technology* (págs. 233-235). Boston, USA: Laxmi Publications.
- Ramírez, & Katime. (Diciembre de 2005). Diseño de Reactores de Polimerización. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 300. Recuperado el 7 de Agosto de 2017
- Ramos, P. (2005). *Gestion del Medio Ambiente*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Rebeiz K., C. A. (1995). *Resources, Conservation and Recycling*. ELSEVIER.
- SEDESOL. (2001). *Manual Técnico - Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal*. Mexico: SEDESOL.
- Serrano, D., & Aguado. (2007). *European Trends In The Feedstock Recycling Of Plastic Wastes*. Móstoles: Global NEST.
- Shetty, N., & Gadag, R. (2014). *Engineering Chemistry* (Tercera ed.). New Delhi: I. K. International.
- SRI. (24 de Junio de 2015). *Costo de PET por Kg*. Obtenido de Resolucion No. NAC—DGERC GC15-00000490: <file:///C:/Users/usuario/Downloads/NAC-DGERC GC15-00000490%20S%20R.O.%20435%2001-07-2015.pdf>
- Tesoro. (1987). Recycling of Synthetic Polymers for Energy Conservation. En *Polimer News* (págs. 265-268).
- Totten, G., Westbrook, S., & Shah, R. (2003). Fuels and Lubricants Handbook: Technology, properties, performance, and testing. En G. Totten, S. Westbrook, & R. Shah, *Fuels: Properties and Performance* (págs. 3-5). West Conshohocken, Estados Unidos: ASTM International. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=J_AkNu-Y1wQC&printsec=frontcover&dq=Fuel+petroleum&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Fuel%20petroleum&f=false
- United Nations Environmental Programme. (2009). *Plastics Conversion to Fuel*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de *Converting Waste Plastics into a Resource; Compendium of Technologies*: http://www.unep.or.jp/letc/Publications/spc/WastePlasticsEST_Compendium.pdf

- Verleye, G., Roeges, N., & De Moor, M. (2001). *Easy Identification of Plastics and Rubbers*. Shropshire: Rapra Technology Limited. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=R5MjyeSJ7PoC&pg=PA4&dq=Test+the+flame+plastics&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwioopyBiO3VAhVBKyYKHe d_BhYQ6AEIKzAB#v=onepage&q=Test%20the%20flame%20plastics&f=false
- Vida, J., Heindl, A., Potzel, U., Schagerl, P., Frolich, F., Zotz, F., . . . Camacho, A. (2012). *Manual de gestion de Residuos industriales peligrosos dirigido a las autoridades de economias de ingresos bajos y medios*. Bonn y Eschborn: GIZ.
- Villarino, N. (2014). *Consumo de Plásticos; PRO ECUADOR*. Obtenido de Petroquímica: Plásticos y Caucho Sintético: <http://www.proecuador.gob.ec/sector7/>
- Wade, L. G. (2012). *QUÍMICA ORGÁNICA* (7ma ed., Vol. 2). México: PEARSON EDUCATION.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A

Análisis ANOVA

Análisis de varianza de un factor para el poder calorífico

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Producto líquido	5	200796	40159	23474
Destilado 1	5	200468	40094	126678
Destilado 2	5	202487	40497	72733

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	469622	2	234811	3,16	0,08	3,9
Dentro de los grupos	891543	12	74295			
Total	1361166	14				

No se puede rechazar hipótesis nula porque $p > 0,05$ (los medios son los mismos)

Análisis de varianza de un factor para el índice de refracción

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Producto líquido	5	7,76	1,5521	4,4E-06
Destilado 1	5	7,69	1,5389	9,2E-07
Destilado 2	5	7,67	1,5342	3,2E-07

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8,6E-04	2	4,3E-04	228	2,9E-10	3,9
Dentro de los grupos	2,3E-05	12	1,9E-06			
Total	8,84E-04	14				

Rechazo Hipótesis nula porque $p < 0,05$ (los medios son diferentes)

ANEXO B

FOTOGRAFÍAS

ANEXO II

Obtención de materia prima



Figura B 1. Determinación de masa de residuos sólidos en la universidad.



Figura B 2. Separación manual de los materiales plásticos en los residuos sólidos dentro del campus universitario.



Figura B 3. Limpiezas de materiales plásticos desechados.



Figura B 4. Secado de los residuos plásticos.

Proceso de Pirólisis



Figura B 5. Material plástico de poliestireno desechado.

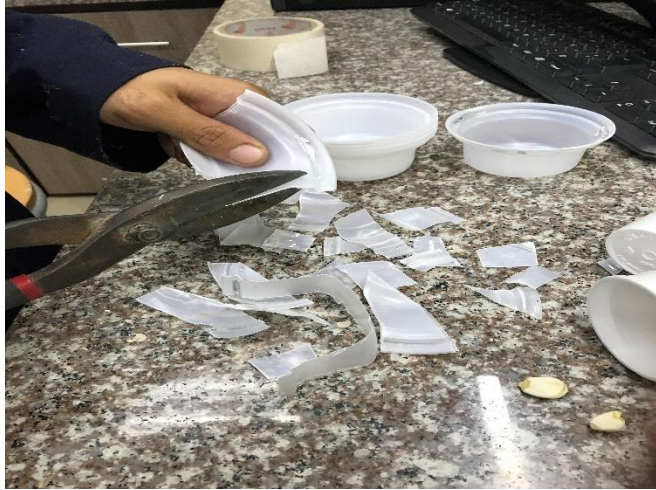


Figura B 6. Trituración del material plástico.

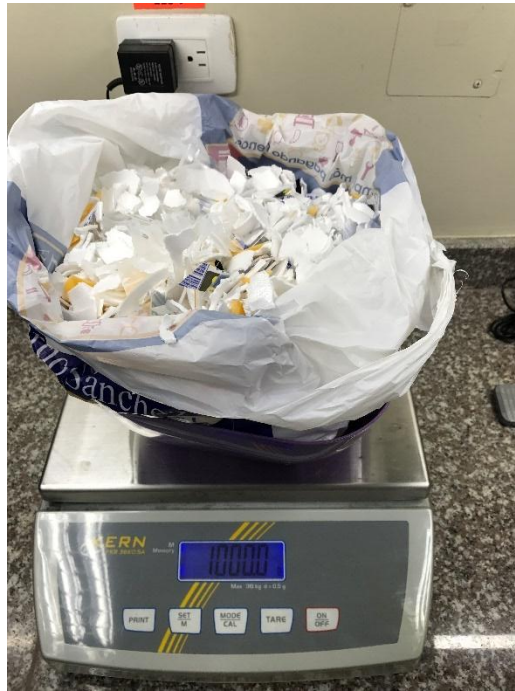


Figura B 7. Masa de material plástico de PS reciclado.



Figura B 8. Alimentación de materia prima en el reactor de pirólisis.



Figura B 9. Sistema del reactor piloto para el proceso de pirólisis.



Figura B 10. Producto Sólido de pirólisis.



Figura B 11. Masa de producto sólido generado del proceso de pirólisis.

Caracterización de producto líquido

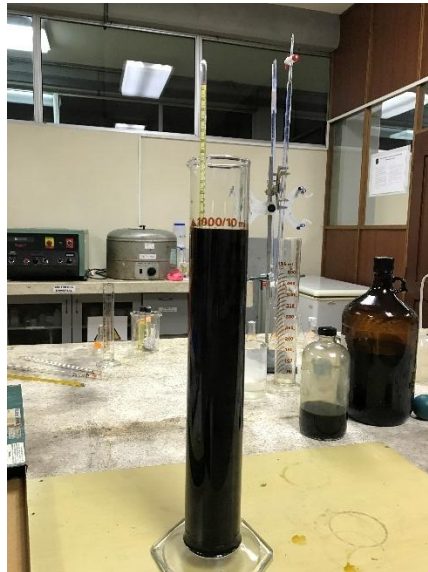


Figura B 12. Determinación de Gravedad API del producto líquido obtenido de pirólisis.



Figura B 13. Determinación de Gravedad API del producto destilado 1.



Figura B 14. Sistema de destilación ASTM.



Figura B 15. Residuo de la destilación del producto líquido de pirólisis.



Figura B 16. Residuo de la destilación del destilado 1.



Figura B 17. Equipo completo para determinación de carbón conradson.



Figura B 18. Sistema para determinar el residuo carbonoso.



Figura B 19. Quema de gases combustibles.



Figura B 20. Determinación de poder calorífico.



Figura B 21. Muestras Equimolares de tolueno - producto analizado.

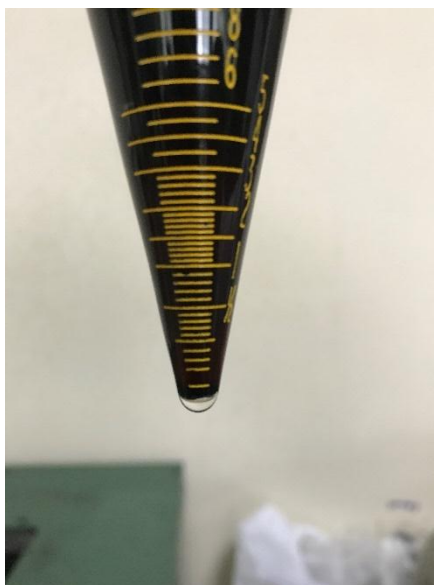


Figura B 22. Determinación de agua y sedimentos en el producto líquido de pirólisis.



Figura B 23. Presencia de sedimento en el producto líquido de pirólisis.



Figura B 24. Determinación de agua y sedimento en destilado 1.



Figura B 25. Preparación de muestra para análisis de contenido de azufre.



Figura B 26. Analizador de azufre.

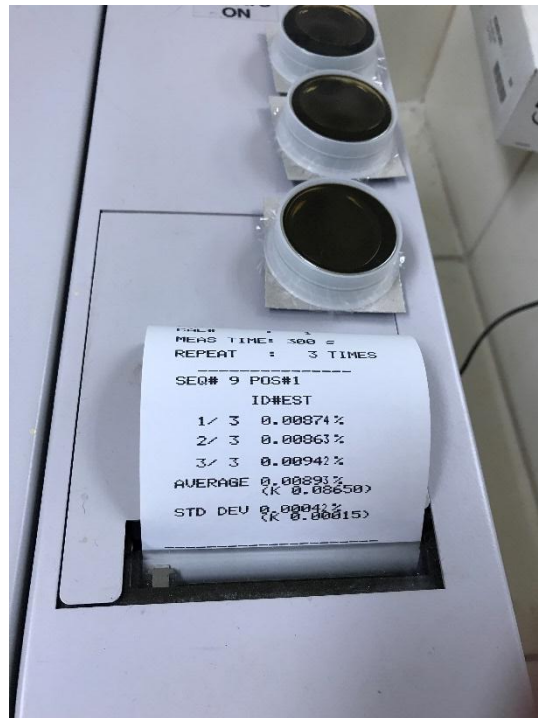


Figura B 27. Resultados obtenidos del análisis de contenido de azufre.

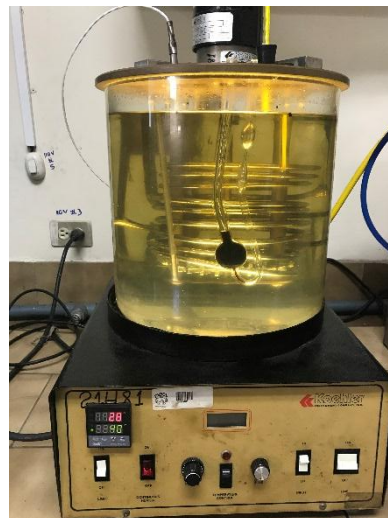


Figura B 28. Determinación de viscosidad cinemática.



Figura B 29. Muestras para determinación de punto de fluidez.



Figura B 30. Sistema de ensayo de punto de fluidez.



Figura B 31. Flujo estático - Temperatura de punto de fluidez.



Figura B 32. Preparación de muestra para análisis de contenido de aromáticos.



Figura B 33. Muestra añadida en la columna de cromatografía para análisis de aromáticos.



Figura B 34. Control de corriente de aire.

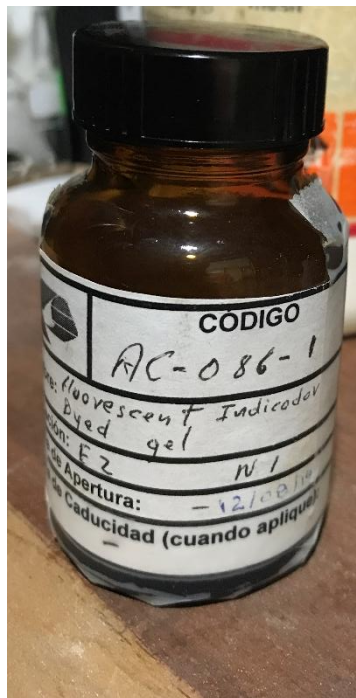


Figura B 35. Fase de contacto - Indicador fluorescente BYED GEL.

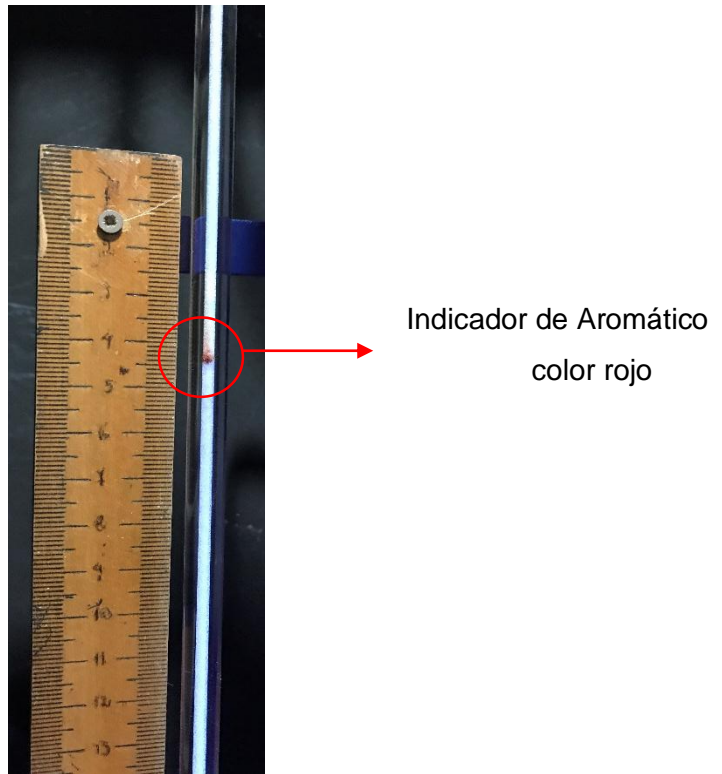


Figura B 36. Punto rojo indicador de aromáticos.

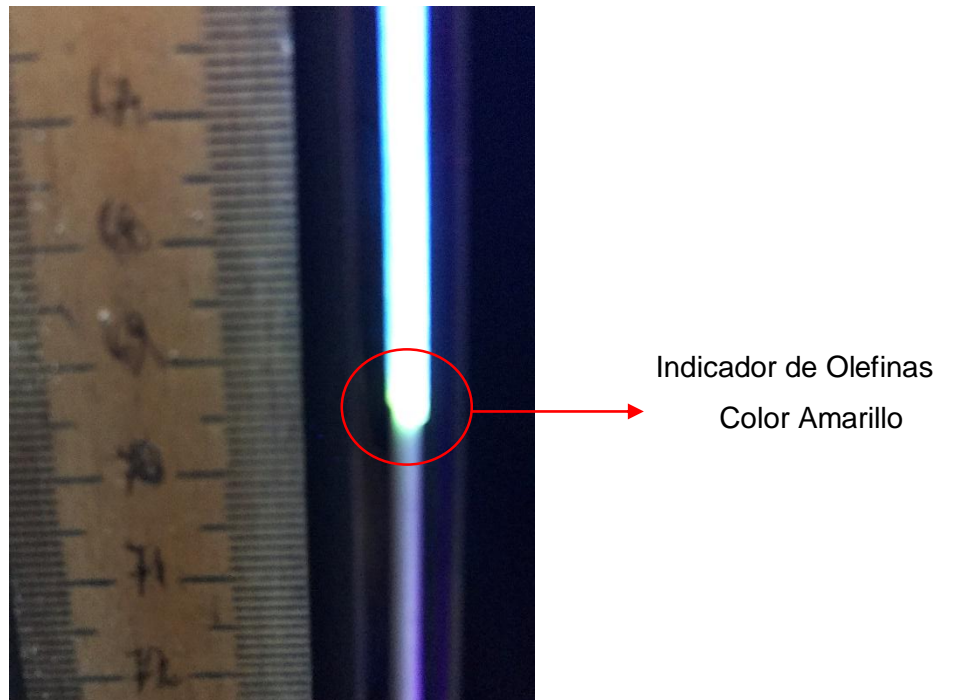


Figura B 37. Punto amarillo indicador de olefinas.

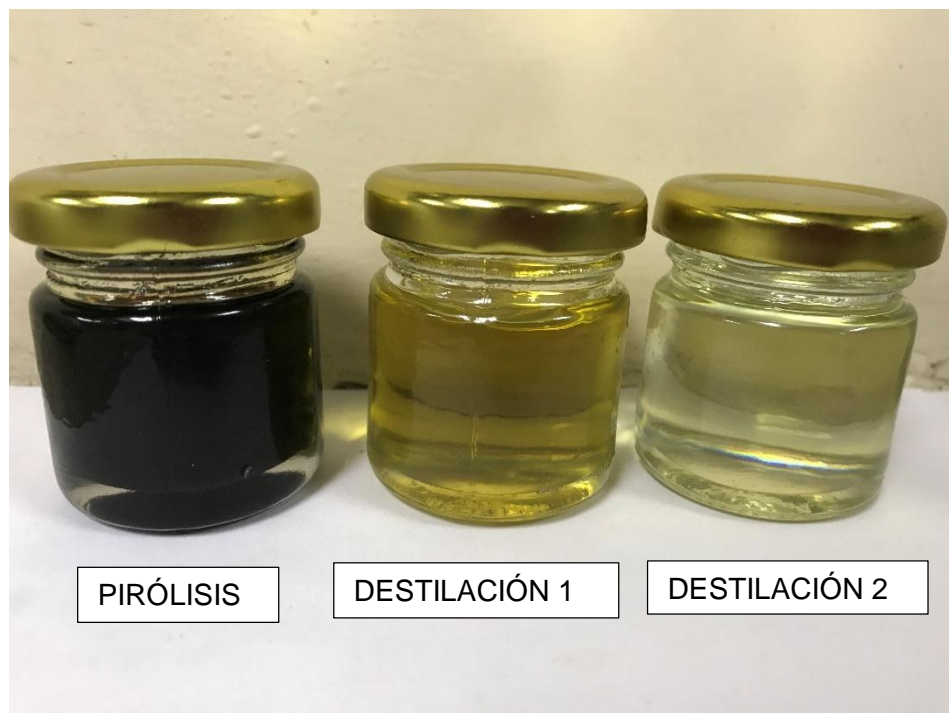


Figura B 38. Productos líquidos obtenidos.

APÉNDICE 3

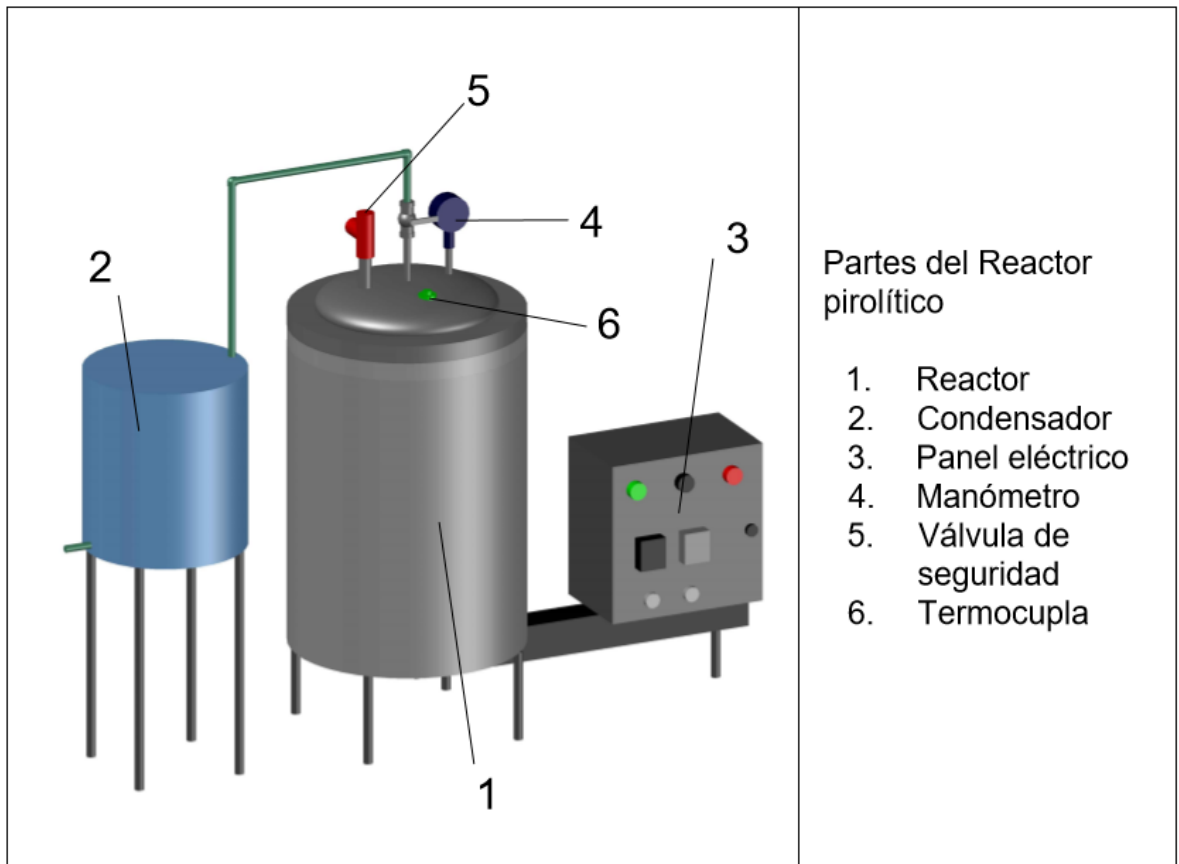


Figura C. 1. Diagrama de Reactor Pirolítico