

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE TEREFTALATO DE
POLIETILENO (PET) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE
PROCESOS DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN”**

AUTOR:

FREDDY DANILO LOJANO QUIROGA

TUTOR:

ING. JORGE BRAULIO AMAYA PINOS, Ph.D

CUENCA - ECUADOR

2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Freddy Danilo Lojano Quiroga con documento de identificación N° 1401038441, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Ambiental* en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad como facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que haga la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Freddy Danilo Lojano Quiroga

C.I. 1401038441

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN”**, realizado por Freddy Danilo Lojano Quiroga, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Ing. Jorge Braulio Amaya Pinos, Ph.D

C.I. 0103444923

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Freddy Danilo Lojano Quiroga con documento de identificación N° 1401038441, autor del trabajo de titulación: **“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN”**, certifico que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2020



Freddy Danilo Lojano Quiroga

C.I. 1401038441

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi mamá, por haber entregado todo de ella para poder llegar a hasta donde he llegado y por haberme enseñado que mediante el esfuerzo y sacrificio se puede lograr lo que uno se propone. A ella que trabajó desde la oscuridad y frío de la mañana hasta la oscuridad de la noche; soportando el calor intenso del sol o el frío de las lluvias sin importarle pasar hambre, dolor o enfermedad con tal de poder llegar a casa y poder brindarle lo mejor a mí y a mis hermanos. Gracias mamá por haberme enseñado a ser humilde y feliz sin importar lo mucho o mucho que se tenga. Que más compensación le puedo brindar a ella que decirle, “gracias madre y he aquí el reflejo de ti”.

De igual manera, agradezco a mi padre, que, a través de la distancia me supo aconsejar, dar fuerzas y ánimos para seguir adelante, a no darme por vencido en los momentos de cansancio y frustración; alentándome siempre a seguir hasta el final con las sabias palabras de, ya estás en la mitad de tus metas, ya te falta poco, ya estas a un paso de lograrlo, ya pasaste lo más difícil y finalmente decir, lo lograste, estoy orgulloso de ti.

Porque no agradecer a mis hermanas y hermanos que me cuidaban todos los días cuando mamá y papá trabajaban, por enseñarme en las tareas, por enseñarme a cocinar, a arreglar la casa, a lavar mi propia ropa, por enseñarme a trabajar y a ser fuerte, demostrarme de que la vida no es fácil y mediante esas enseñanzas poder valorar lo que teníamos. Gracias hermanos por motivarme a seguir estudiando y mostrar esa alegría, felicidad y entusiasmo de quererme ver en lo más alto y ser ejemplo a seguir de sus hijos.

A mis tíos, a mis tías, a mis primos y a mis primas, gracias por ese apoyo incondicional, por ese empuje de querer verme lograr esta gran meta, gracias por estar pendientes en mi proyección y objetivo.

A mis amigos de la escuela, colegio, a mis amigos con los que practicaba deporte, a mis amigos de la universidad, gracias por acompañarme en este gran proyecto de vida, por ser parte de momentos alegres, por estar presentes cuando se cometía errores, gracias por estar pendientes de cómo ve iba en los estudios, por estar pendientes de cuando termino o cuanto me falta para culminar los estudios, gracias por mostrarme esa alegría de verme cuando regresaba al pueblo o cuando retornábamos a un nuevo ciclo de estudio y decirnos ya estamos al último o ya estás en lo último, a ustedes mi amigos les digo gracias.

Finalmente a mis profesores del colegio y universidad, un agradecimiento especial por brindarme sus conocimientos, sus experiencias, por reprochar mis errores y enseñarme a levantarme de las caídas, gracias profesores por sus consejos y mencionar no solo a mi sino a todos los compañeros que somos el futuro del país, que no debemos caer ante las necesidades y sobre todo gracias por esa mención de aliento que todo estudiante debe recibir en el momento de tropiezos y decían, la universidad es de resistencia no de velocidad.

DEDICATORIA

Este logro alcanzado se la dedico a todas las personas que creyeron en mí, y me brindaron su fuerza de aliento para seguir adelante, aconsejándome a no desaprovechar esta oportunidad de estudio que mucho de ellos no lo tuvieron o no lo supieron aprovecharon, sintiéndose siempre orgullosos de mí y esperando siempre verme triunfar.

RESUMEN

Los plásticos poseen una amplia gama de aplicaciones debido a su bajo costo de producción y sus propiedades termo resistentes, por lo que lo han llevado a ser uno de los materiales que más se usan y se producen en el mundo tanto para envasado de alimentos, de bebidas, de embalajes, y un sinfín de usos. Debido a estos aspectos, los envases plásticos han generado un sin número de impactos ambientales a causa de su mala utilización y disposición final, provocando principalmente, un impacto visual en el entorno, e incluso, llegando a causar intoxicación y muertes de especies acuáticas y terrestres al ser incorporados por estos en su cadena alimenticia.

Uno de los residuos plásticos que mayor se genera y se consume, son los envases de PET, que son utilizado para envases de bebidas, siendo el que mayor problema ha generado en su manejo debido a su rápido desecho y su acumulación volumétrica. Se ha tomado como una medida inmediata, la reutilización de las botellas PET para utilizarlas nuevamente como envases o procesarlas para obtener un nuevo producto.

Uno de las soluciones para aprovechar los residuos plásticos es el reciclado químico. El reciclado químico consiste en transformar el plástico mediante el uso de calor para romper las moléculas de polímeros, obteniendo así, los componentes iniciales del plástico (monómeros) y transformarlos en diferentes productos como son: productos sólidos (carbón), líquidos (hidrocarburo) y gaseoso (CO_2 , CO , CH_4 y otros) (Espinoza & Cabrera, 2014; Pinedo, 2013).

En esta investigación se buscó implementar dos técnicas del reciclado químico, la pirólisis y gasificación para obtener un producto líquido o un hidrocarburo aceitoso similar al petróleo.

El método de pirólisis se basó en la transformación de botellas PET, a temperaturas comprendidas entre 300 y 500 °C, cuyas reacciones se realizaron en ausencia de oxígeno. El proceso de gasificación se realizó a temperaturas comprendidas entre 500 y 900 °C, en donde la transformación del PET a combustible utilizando agua como agente gasificante.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
ÍNDICE GENERAL	VI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específico	3
CAPÍTULO 2	4
2. Marco teórico.....	4
2.1. Polímeros	4
2.1.1. Procesos de polimerización	4
2.1.2. Clasificación de los polímeros.....	6
2.2. El Plásticos.....	8
2.2.1. Origen de los Plásticos	8
2.2.2. Uso y aplicaciones del plástico.....	10
2.2.3. Propiedades de los plásticos	10
2.2.4. Tipos de plásticos	13
2.3. Tereftalato de polietileno (PET).....	15
2.3.1. Propiedades del PET	17
2.3.2. Aplicaciones del PET	18
2.4. PET como residuos plásticos	19
2.4.1. Impactos del PET.....	19
2.4.2. Riesgos a la salud de las personas y al ambiente	20
2.5. El Reciclaje de los plásticos.....	21
2.5.1. Situación del PET en el mundo	22
2.5.2. Situación del PET en el Ecuador	23
2.6. Métodos de reciclado de residuos plásticos	26
2.6.1. Reducción en su fuente	26

2.6.2.	Reciclado mecánico o tratamiento primario.....	26
2.6.3.	Tratamiento secundario.....	27
2.6.4.	El reciclado terciario o reciclado químico.....	27
2.6.5.	El reciclado cuaternario.....	27
2.7.	Reciclaje químico.....	28
2.7.1.	Pirólisis.....	30
2.7.2.	Proceso de reacción pirolítico.....	33
2.7.3.	Gasificación.....	36
2.7.4.	Proceso de reacción en gasificación.....	39
2.8.	Combustibles.....	40
2.8.1.	Propiedades de los combustibles.....	41
2.8.2.	Espectroscopia del infrarrojo (IR).....	43
CAPÍTULO 3.....		51
3.	Materiales y Métodos.....	51
3.1.	Obtención y tratamientos de botellas PET.....	51
3.2.	Descripción del reactor de pirólisis.....	53
3.3.	Descripción del equipo de gasificador.....	55
3.4.	Ensayos Físico-Químicas.....	56
3.4.1.	Rendimiento.....	56
3.4.2.	Color y olor.....	58
3.4.3.	Densidad.....	58
3.4.4.	Grados API.....	60
3.4.5.	Viscosidad.....	62
3.4.6.	Punto de inflamación y combustión.....	65
3.4.7.	Punto de congelación.....	66
3.4.8.	Calor específico.....	67
3.5.	Metodología de la Espectroscopia de infrarrojo.....	69
CAPÍTULO 4.....		70
4.	Resultados y Discusión.....	70
4.1.	Rendimiento.....	70
4.2.	Color y Olor.....	73
4.3.	Resultados pirólisis.....	74
4.3.1.	Densidad.....	74

4.3.2.	Grados API.....	75
4.3.3.	Viscosidad.....	75
4.3.4.	Calor específico.....	78
4.3.5.	Punto de inflamación y punto de combustión.....	79
4.3.6.	Punto de congelación.....	79
4.3.7.	Espectro de infrarrojo.....	80
4.4.	Resultados Gasificación.....	81
4.4.1.	Densidad.....	81
4.4.2.	Grados API.....	82
4.4.3.	Viscosidad.....	83
4.4.4.	Calor específico.....	84
4.4.5.	Punto de inflamación y punto de combustión.....	85
4.4.6.	Punto de congelación.....	86
4.4.7.	Espectro de infrarrojo.....	86
4.5.	Discusión.....	88
5.	Conclusiones.....	94
6.	Recomendaciones.....	96
7.	Bibliografía.....	97
	Anexos.....	102

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los plásticos según la SPI.	16
Tabla 2. Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y temperatura y los productos obtenidos de interés en cada una de ellos.	32
Tabla 3. Tipo de crudo según Grados API.....	62
Tabla 4. Rendimiento de los procesos de pirólisis y gasificación.	71
Tabla 5. Resultado de prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.	72
Tabla 6. Variables para determinar la densidad de la muestra.	74
Tabla 7. Pesos de la muestra de los diferentes ensayos.	74
Tabla 8. Tiempos obtenidos en fluir el agua en el viscosímetro.	76
Tabla 9. Tiempos obtenidos en fluir la muestra en el viscosímetro.	77
Tabla 10. Variables para determinar el calor específico de la muestra.	78
Tabla 11. Temperatura de equilibrio obtenida en los ensayos de la muestra de pirólisis.....	78
Tabla 12. Variables para determinar la densidad de la muestra.	81
Tabla 13. Pesos obtenidos de la muestra de gasificación con el picnómetro de 10 ml.....	82
Tabla 14. Variables consideradas para determinar los grados API.....	82
Tabla 15. Tiempos de flujo de la muestra de gasificación en el viscosímetro.....	84
Tabla 16. Variables para determinar el calor específico de la muestra.	84
Tabla 17. Temperatura de equilibrio obtenida en los ensayos de la muestra.	85
Tabla 18. Tabla de parámetros fisicoquímicos encontrados y especificaciones técnicas dispuestas para combustibles.....	91

Lista de Fotografías

Fotografía 1. Des-etiquetado de botellas PET.	51
Fotografía 2. Lavado de las botellas PET.	52
Fotografía 3. Botellas PET picadas.	52
Fotografía 4. Botellas PET molidas.....	53
Fotografía 5. Reactor pirolítico artesanal.....	54
Fotografía 6. Peso de Picnometro vacio.	59
Fotografía 7. Peso de hidrocarburo a 30°C.	59
Fotografía 8. Determinación de la constante de calibración del viscosímetro.	63
Fotografía 9. Prueba para determinar el punto de inflamación en aparato Cleveland.....	66
Fotografía 10. Prueba de calorimetría.	68
Fotografía 11. Determinación de la temperatura de equilibrio en calorímetro.	68
Fotografía 12. Espectrómetro FTIR modelo NICOLET i510 de la UPS.	69
Fotografía 13. Producto obtenido en proceso de pirólisis.	70
Fotografía 14. Producto obtenido en proceso de gasificación.....	71
Fotografía 15. Prueba de color de los productos de gasificación y pirólisis.	73
Fotografía 16. Prueba en viscosímetro de ostwald para calcular el tiempo de flujo del hidrocarburo.....	77
Fotografía 17. Determinación del punto de inflamación del hidrocarburo de pirólisis.....	79
Fotografía 18. Determinación del punto de congelación del hidrocarburo de pirólisis.	80
Fotografía 19. Prueba en viscosímetro de ostwald para calcular el tiempo de flujo del hidrocarburo de gasificación.	84
Fotografía 20. Determinación de punto de inflamación del hidrocarburo de gasificación.	86
Fotografía 21. Determinación del punto de congelación del hidrocarburo de gasificación.	86

Lista de figuras

Figura 1. Escisión de la cadena polimérica.....	33
Figura 2. Escisión β de radical primario.	34
Figura 3. Ruta 1 de la estabilización del radical secundario.....	35
Figura 4. Transferencia Intermolecular de hidrógeno.	35
Figura 5. Esquema del proceso de gasificación.	40

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Diseño de reactor para el proceso de pirólisis.	54
Ilustración 2. Diseño de reactor para proceso de gasificación.....	55
Ilustración 3. Espectro IR del hidrocarburo obtenido en el proceso de pirólisis.....	80
Ilustración 4. Espectro IR del hidrocarburo obtenido en el proceso de Gasificación.....	87

Lista de Anexos

Anexo 1. Termómetro industrial con capacidad de 550°C.....	102
Anexo 2. Reactor al rojo vivo, a causa de alta temperatura.	103
Anexo 3. Requisitos fisicoquímicos Jet A-1.	104
Anexo 4. Densidad del agua.	105
Anexo 5. Factor de corrección (b).....	105
Anexo 6. Pruebas realizadas en Pirólisis.	106
Anexo 7. Pruebas realizadas en Gasificación.	108
Anexo 8. Tablas para la interpretación básica de espectros en la región infrarroja.	109
Anexo 9. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas.	113
Anexo 10. Requisitos de la gasolina de 87 octanos.	114
Anexo 11. Requisitos del diésel premium.	115
Anexo 12. Producto de PET	115
Anexo 13. Espectro FTIR de botella plástica (PET).....	116
Anexo 14. Espectros de productos líquidos obtenidos en la pirólisis con zeolita sintética.	117
Anexo 15. Espectro FTIR de Diésel y Biodiesel.	117

CAPÍTULO 1

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El principal problema a nivel mundial que ha surgido en los últimos años, es la dependencia principalmente de los combustibles fósiles, los mismos que están encaminados a su agotamiento y que pueden provocar una serie de problemas en la supervivencia de la humanidad. Si a esta problemática se le suma la contaminación ambiental que se genera tanto para la explotación, transformación y uso de sus derivados, se está generando una bomba de tiempo que pone en riesgo no solo la supervivencia de la humanidad sino de los seres vivos en general (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Vazquez, Beltrán, Perez, & Espinosa, 2016).

Mediante la explotación y transformación de los recursos fósiles, se logra obtener los polímeros (componente principal para la obtención del material plástico), esto ha conllevado a que el petróleo sea una materia prima de mucha importancia para varias industrias, en especial al de los plásticos. El plástico, mediante su uso progresivo en las industrias, se ha convertido en un punto crítico a nivel mundial debido a la contaminación que estos generan (Clavijo M & Fárez M, 2018; Vazquez et al., 2016).

Los diferentes tipos de plásticos se han venido utilizando desde hace más de 100 años, por lo que su uso y aplicaciones han venido evolucionando y mejorando en propiedades de resistencia, flexibilidad, calidad entre otros. Las botellas PET que se utilizan como envases para bebidas, es el tipo de plástico que mayor impacto ha generado a nivel mundial, pues, su principal problema es el corto tiempo de vida útil, es decir, el momento en el que el producto que contiene el envase es consumido, la botella es desechada (Vazquez et al., 2016).

El problema radica en que su disposición final no se lo realiza de la mejor manera, pues estos plásticos fueron y son desechados de manera inconsciente a la intemperie y no en un lugar de deposición de residuos. Este tipo de acción sumada a la población mundial, ha generado un caos a medida que ha pasado los años, pues al ser desechadas, estas son transportadas por la lluvia, el viento llegando al río, ocasionando su acumulación en las orillas de los ríos e incluso llegando al mar, siendo este lugar donde se acumula en mayor cantidad y donde existe mayor diversidad de especies acuáticas. Estos residuos al estar presente en el hábitat de todo tipo de especies, ha ocasionado que los seres vivos los confundan como alimento, entrando así a su cadena alimenticia que de forma inmediata o en poco tiempo provoque laceraciones, intoxicaciones y por último la muerte de especies acuáticas (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Téllez, 2012).

1.2. Justificación

En nuestro país existen pequeñas plantas y empresas que se encargan de transformar los residuos plásticos en otros productos como ropa de vestir, materiales de construcción o de limpieza. Sin embargo, dichas tecnologías solo transforman y reutilizan pequeñas cantidades de plásticos, lo que no permite dar una solución total a la problemática de los residuos plásticos (Vichique Tecalco, 2010).

Gracias a la implementación de campañas de concientización y a programas de recolección de botellas PET, se ha logrado reducir considerablemente sus impactos en el ambiente. La reducción de los residuos plásticos y sus impactos, se pueden incrementar mediante la implementación de nuevas tecnologías, sistemas y procesos físicos o químicos (Romero Moreira, 2017; Téllez, 2012).

En el país no se cuenta con plantas de gasificación que produzcan gas de síntesis a partir de residuos plásticos, tampoco existe investigaciones que se asemejen a la composición del syngas que se obtendría al gasificar carbón vegetal, desechos agrícolas peor aún el aprovechamiento de los plásticos (Zurita Saltos, 2013). Es por ello, que se ha buscado obtener un hidrocarburo mediante la transformación térmica de las botellas PET, en procesos de gasificación y pirólisis, y así aportar información de innovación al país y poder buscar futuras fuentes de recursos que reemplazarían a la dependencia del petróleo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Comparar el rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis y gasificación, aprovechando botellas plásticas de Tereftalato de Polietileno (PET).

1.3.2. Objetivos Específico

- Comparar los rendimientos de los combustibles obtenidos.
- Determinar variables macroscópicas óptimas para desarrollar el proceso de pirólisis y gasificación.
- Determinar las características y propiedades de los combustibles obtenidos entre los diferentes procesos.
- Determinación del mecanismo de formación de los diferentes grupos de compuestos formados a partir del PET.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

2.1. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas que están constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes en reacciones denominadas reacciones de polimerización. La reacción de polimerización se efectúa en un reactor donde se incorporan los monómeros y otros componentes o catalizadores que se requieren para obtener cadenas largas de polímeros (Beltran & Marcilla, 2011; Hermida, 2011).

El polímero se forma a partir de pequeñas moléculas llamados monómeros, que se combinan mediante reacciones de polimerización. La unión de los monómeros forma una estructura de constitución repetitiva en el polímero a lo largo de toda la molécula, y se le conoce como unidad constitucional repetitiva (ucr) o unidad monomérica (Bustamante, 2012).

2.1.1. Procesos de polimerización

Los procesos de polimerización normalmente se dividen en dos grandes grupos, estos son: reacciones de adición y reacciones de condensación; o también se los conoce como polímeros de reacción por etapas y polímeros de reacción en cadena. Dependiendo del proceso de polimerización, se obtienen los polímeros de adición y los polímeros de condensación (Beltran & Marcilla, 2011).

En la polimerización por condensación se producen reacciones químicas sencillas entre moléculas que poseen grupos funcionales. El proceso de polimerización ocurre cuando los monómeros se unen unos con otros siempre en el mismo orden. Las reacciones de

polimerización continúan hasta que se haya logrado reaccionar la mayoría de los reactivos dispuestos, permitiendo que se establezca un equilibrio mediante el control de la temperatura y las cantidades de los reactivos y los productos (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012; Hermida, 2011).

En la polimerización por adición ocurren reacciones en secuencia o cadena, en la que los intermediarios del proceso (radical libre, ion) son transitorios y no pueden ser aislados. La unidad estructural de repetición de los polímeros de adición posee la misma composición que la del monómero de partida. En este proceso la mayoría de los polímeros polimerizan vía doble enlace (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012; Hermida, 2011).

La mayoría de los polímeros de adición son termoplásticos, mientras que los de condensación pueden ser termoplásticos (poliamidas, poliésteres lineales) y termoestables (poliésteres insaturados, resinas) (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

También existen procesos de polimerización por suspensión, emulsión y masa (Hermida, 2011):

- Las reacciones de polimerización en suspensión, se caracteriza debido a que el monómero y catalizador se suspenden en el agua formando gotas pequeñas. Con el fin de evitar que el polímero generado se acumule en el reactor, se vierte en el agua pequeñas cantidades de alcohol polivinílico, el mismo que cubre la superficie de las gotas del polímero formado y evita que estos se adhieran en el reactor.
- El proceso de polimerización en emulsión, también se lo efectúa en agua, pero, en lugar de utilizar alcohol polivinílico se utiliza un agente emulsificante que puede ser jabón o detergente y en su interior se produce la polimerización.

- En la polimerización de masa, actúan únicamente el monómero y el peróxido. El polímero obtenido es muy similar al polímero obtenido en la polimerización de suspensión, con la particularidad de que el polímero de masa es más puro y tienen propiedades de adsorción de aditivos debido a que no contiene restos de alcohol polivinílico.

2.1.2. Clasificación de los polímeros

Los polímeros se suelen clasificar principalmente según su origen o formación, según la composición de su estructura macromolecular, por sus propiedades y también considerando el uso que se le brinda (Beltran & Marcilla, 2011; Klein, 2014).

2.1.2.1. Según su origen

- Polímeros Naturales. – como su nombre los indica, son polímeros de origen natural, producidas por organismos vivos que se emplean sin modificación. La composición molecular de estos polímeros es muy compleja y se los puede obtener de árboles (caucho natural) o también se pueden encontrar en las telas de araña (Beltran & Marcilla, 2011; Hermida, 2011).
- Polímeros Sintéticos. – estos polímeros, son macromoléculas obtenidas por procesos creados y diseñados principalmente por el ser humano, y se pueden dividir según su comportamiento al ser sometidos a fuentes de calor, estos son: Los termoplásticos, son polímeros de cadena larga que poseen la particularidad de reblandecerse cuando es sometido a calor y pueden ser moldeadas una y otra vez mediante la aplicación de presión para finalmente enfriarse y recuperar sus propiedades físicas (como ejemplo se puede nombrar al PE y PS)(Castaño Meneses, 2010). Los termorrígidos, son polímeros que se descomponen cuando son sometidos a fuentes de calor, teniendo en

cuanta de que estos no se pueden fundir ni se pueden solubilizar, quedando rígidos al ser enfriados por formar nuevos enlaces (Hermida, 2011).

2.1.2.2. *Según la estructura de la cadena*

Según (Hermida, 2011) y (Bustamante, 2012), los polímeros que se clasifican según la composición estructural de la cadena son:

- Lineal. – las secuencias de la unión de los polímeros siempre se repiten a lo largo de la cadena.
- Ramificada. – la cadena principal que constituye el polímero posee cadenas adicionales que se unen en sus laterales.
- Entrecruzada. – ocurre solo cuando se forman nuevos enlaces en las cadenas vecinas.
- Homopolímeros. – son los polímeros en la cual, cuyos monómeros que los conforman son iguales.
- Copolímeros. – estos polímeros están constituidos por dos o más monómeros diferentes.

2.1.2.3. *Por sus propiedades:*

Los polímeros que se clasifican según sus propiedades planteadas por (Klein, 2014), son los siguientes:

- Termoplásticos. – son polímero que a temperatura ambiente son duros, pero son blandos cuando se calientan.
- Elastómeros. – son polímeros que vuelven a su forma original después de estirarse. Normalmente, los elastómeros son polímeros amorfos que tienen un pequeño grado de enlaces cruzados.

- Fibras. – se generan cuando algunos polímeros se calientan, se los fuerza a pasar a través de pequeños agujeros y luego se enfrían. Las fibras resultantes muestran regiones cristalinas que están orientadas a lo largo del eje de la fibra, que le confieren una alta resistencia a la tracción.
- Resinas termoendurecibles. – en general, son polímeros que poseen varios enlaces cruzados, permitiéndoles ser muy duras e insolubles.

2.2. El Plásticos

Los plásticos son todos los materiales que están formados por polímeros que bien pueden ser de origen natural y sintético. Los plásticos de origen sintético son obtenidos mediante procesos de refinación del petróleo crudo. El costo en el procesamiento para la obtención del plástico varía de acuerdo a las propiedades mecánicas que se desea obtener como la resistencia, impermeabilidad, flexibilidad entre otros (Hermida, 2011; Vazquez et al., 2016; Vichique Tecalco, 2010).

2.2.1. Origen de los Plásticos

El origen del primer plástico se relata que fue en 1869, como resultado de un concurso lanzado en esa época con el fin de obtener un sustituto de las bolas que se utilizan en el juego de billar elaborados de marfil natural.

Wesley Hyatt, un inventor norteamericano participo en dicho concurso y presento un producto denominado celuloide, que se producía sometiendo la piroxilina a alta presión y reaccionándolo con un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente, de alcohol. Este producto no tuvo acogida en dicho concurso, pero si tuvo un notable éxito comercial, pues con ello se empezaron a fabricar mangos de cuchillos, armazones para lentes y mediante este invento se inició la industria de

películas cinematográficas a fines del siglo XIX. Este producto se lo calificó como un producto termoplástico, puesto que puede ser ablandado y moldeado mediante calor (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Hermida, 2011).

La industrialización de los plásticos, surge por la necesidad de obtener nuevos materiales que se puedan utilizar en el campo de ingeniería. Durante el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, se redujo los suministros de materia prima para las llamadas fuerzas del Eje y sus aliados. La industria de los plásticos demostró ser una fuente inagotable de sustitutos aceptables, lo que provoco que Alemania pierda sus fuentes de látex, por lo que lo conllevo a desarrollar métodos para obtener caucho sintético. A Estados Unidos se cortó el suministro de caucho natural proveniente de Japón, puesto que este, entro en dicho conflicto; y como medida de sustitución desarrollo sistemas de producción para la obtención de plástico, especialmente el nylon. El nylon se convirtió en una de las fuentes principales de fibras textiles, los poliésteres se usó en la fabricación de materiales de blindajes y otros materiales de uso bélico, llegando a producir fuertes volúmenes y variedades de caucho sintético (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Hermida, 2011).

Años posteriores de que la guerra concluyera, se continuó y aumento el desarrollando la industria de los plásticos. Se tuvo primordial interés en los avances en plásticos técnicos, como los policarbonatos, los acetatos y las poliamidas. El plástico llego a sustituir algunos materiales de metales en algunos componentes de maquinarias, cascos de seguridad y muchos otros materiales que se empleaban para trabajar bajo condiciones ambientales extremas. El polietileno recién fue creado por Karl Ziegler en 1953, y el polipropileno por Giulio Natta en 1954, que son los dos plásticos más utilizados en la actualidad (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Hermida, 2011).

2.2.2. Uso y aplicaciones del plástico

El plástico se utiliza principalmente en la industria relacionada con el empaquetado, para ello se requieren grandes cantidades de rollos de plástico transparente de polietileno de baja densidad. De igual manera, se utiliza el polietileno de alta densidad en forma de película más gruesa que son principalmente las bolsas plásticas para la recolección de basura. Para empaquetado también se suele utilizar el polipropileno que actúa como barrera para evitar el paso del vapor de agua y se utiliza frecuentemente para elaborar alfombras. El poliestireno se usa como protector de estructuras frágiles, el policloruro de vinilideno es usado para aplicaciones donde se requiere hermeticidad, ya que no permite el paso de gases hacia dentro o hacia fuera del paquete. El policloruro de vinilo (PVC) se utiliza en tuberías y otros materiales de construcción como techos, ventanas y muchas más variedades (Bustamante, 2012; Hermida, 2011; Vichique Tecalco, 2010).

2.2.3. Propiedades de los plásticos

Considerando que existen variedades de plásticos que poseen diferencias en su composición y estructura molecular, se pueden encontrar algunas propiedades comunes (Beltran & Marcilla, 2011; Bustamante, 2012):

- Densidad. – los plásticos poseen densidades relativamente bajas que van de 0.9 a 2.3 g/cm³. La baja densidad permite al plástico ser fácilmente manipulable y ligero (Beltran & Marcilla, 2011).
- Resistencia al ataque químico. – estos plásticos deben ser resistentes a ataques químicos y son utilizados principalmente en la industria química y alimenticia, para la cual se considera la naturaleza del grupo funcional de cada monómero y su estructura. En este caso se utilizan las poliolefinas, que poseen enlaces C-C y C-H, y

tienen una alta resistencia frente a ácidos, bases y disolventes (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

- Solubilidad. – los polímeros termoestables son solubles en disolventes puesto que este no puede separar las cadenas entrecruzadas, tan solo se produce un hinchamiento. Los polímeros de cadena lineal presentan respuestas más variadas a los disolventes, en función de la temperatura, el disolvente en cuestión y los grupos funcionales (Bustamante, 2012).
- Resistencia al envejecimiento. – principalmente en los plásticos se busca que sean susceptibles a la oxidación térmica y fotoquímica, es por ello que algunos plásticos presentan una diversidad de densidades y colores con el fin de evitar que se degraden con facilidad al estar presentes a la radiación solar directa o al entrar en fricción con otros materiales.
- Conductividad térmica. – la conductividad de los plásticos a diferencia de los metales es muy inferior debido a la ausencia de electrones libres, lo que conlleva a tener inconvenientes durante su transformación. Viendo de otra perspectiva, el plástico llega a ser muy eficiente, puesto que permite utilizarlo como un aislante térmico (Beltran & Marcilla, 2011).
- Permeabilidad. – este aspecto se considera principalmente en la industria que están relacionados con plásticos de envases y embalajes. Los plásticos deben tener la seguridad de que gases u otros componentes no pasen la barrera plástica con el fin de evitar reacciones o corrosiones con su contenido. Los plásticos deben impedir el paso principalmente a componentes como vapor de agua, O₂, CO₂ o N₂, e incluso se debe impedir el paso de organismos microscópicos como bacterias.

- Adherencia. – el principal sector que considera este aspecto es el sector que trabaja con adhesivos (Tojes Pacheco, 2015).
- Propiedades mecánicas. – se refiere principalmente a aspectos de densidad de los plásticos con el fin de brindar resistencia a golpes, fricciones con otros materiales, presión por sobrecarga entre otros. Considerando su resistencia frente a esfuerzos, los plásticos se puede clasificar en: fibras, plásticos rígidos, plásticos flexibles y elastómeros (Coreño Alonso & Méndez Bautista, 2010).
- Propiedades ópticas. – estas propiedades se consideran específicamente cuando la transmisión de luz y el índice de refracción de luz pueden afectar o pueden ser necesario en la conservación de un producto. Los plásticos cristalinos son opacos y permiten la dispersión de la luz, mientras que los amorfos son transparentes, lo que no permite la difracción solar. Los plásticos que poseen ambas características combinadas se les denomina semicristalinos. Un campo en donde se considera las propiedades ópticas de los polímeros, es el sector que trabajan con lentes ópticos de policarbonatos, fibras ópticas de polimetacrilato de metilo o los que trabajan con filtros ópticos. La transparencia de los plásticos se puede ver afectados por exposición a radiación solar o cambios bruscos de temperatura (Beltran & Marcilla, 2011; Coreño Alonso & Méndez Bautista, 2010).
- Conductividad eléctrica. – su resistencia es muy elevada y por lo tanto posee baja conductividad eléctrica, lo que le ha permitido ser muy eficiente en el campo eléctrico. Se utiliza para formar los circuitos eléctricos, y un sin número de aplicaciones en componentes eléctricos debido a que los plásticos no son conductores

de electricidad y no pueden causar interferencias en sus circuitos (Beltran & Marcilla, 2011).

- Temperatura de transición vítrea. – es el intervalo de temperatura que permite a los plásticos pasar de un estado flexible a rígido cuando son enfriados (Bustamante, 2012).

2.2.4. Tipos de plásticos

2.2.4.1. *Plásticos termoplásticos*

Los termoplásticos están constituidos por polímeros que bien pueden poseer estructuras moleculares lineales o poco ramificadas, y se caracterizan por su fácil y constante moldeo cuando son sometidos a fuentes de calor, convirtiéndolos en plásticos de fácil reciclado y fácil manejo, e incluso cuando se habla de reciclado de plásticos de manera general se está refiriendo a los termoplásticos, ya que en estos conforman una diversidad de plásticos como son los HDPE (tuberías de agua, depósitos de basura), LDPE (bolsas de plástico, film), PET (contenedores de frutas, fibras resistentes), PS (encases de yogures, cubiertos y vajillas desechable, aislantes), PVC (tuberías plásticas, tarjetas electrónicas) (Crespo Palma, 2013; Téllez, 2012; Vichique Tecalco, 2010).

Los polímeros termoplásticos no tienen una estructura física determinada: algunos son amorfos, otros son cristalinos y algunos tienen un comportamiento mixto, e incluso la mayoría de los polímeros termoplásticos aceptan el agregado de colorantes, modificadores de propiedades y rellenos, llamados también fillers, como negro de humo, dióxido de titanio y similares (Canale, 2015).

Los termoplásticos son combustibles y sensibles a la radiación ultravioleta del sol, por lo que se suelen adicionar aditivos con filtros de radiación y retardantes de llama. Las

propiedades de estos plásticos se pueden controlar ajustando el largo de las cadenas de monómeros, por obtención de ramificaciones, por transparencia, mezclado y uso de plastificantes (Canale, 2015).

A medida que el peso molecular aumenta, la resina se vuelve más dura, rígida y más resistente al ataque químico. Pero se hace más difícil de moldear. Los polímeros cristalinos tienen a tener mejor resistencia química que los amorfos. Para tener transparencia, el polímero deberá ser amorfo. Los polímeros más transparentes son los acrílicos, policarbonatos, poliestireno y el PET. Para paredes delgadas deben elegirse resinas de bajo peso molecular (PM); para mejor desempeño mecánico, deben elegirse las de mayor PM (Canale, 2015).

2.2.4.2. *Plásticos termoestables*

Al contrario de los termoplásticos, los polímeros termoestables son resinas que no aceptan ciclos térmicos y una vez que han reaccionado y endurecido, cualquier calentamiento ulterior conducirá a la degradación y combustión del material, provocando una transformación química en sus moléculas y creando una red tridimensional (Canale, 2015).

Los polímeros termoestables son materiales que cuando sufren una transformación y pierden sus características físicas no pueden volver a ser moldeados, por lo que los conlleva a no tener mucha acogida en el reciclado (Crespo Palma, 2013; Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

Estos tipos de plásticos se los puede reciclar para después de un proceso de triturado incorporarlo como carga en otro proceso. A nivel general de producción de plásticos, los polímeros termoestables ocupan un 20% de producción, los mismo que se pueden distinguir en Resinas Poliuretano o PUR (pinturas, esponjas de colchones), Resinas Epoxy

(componente de adhesivos, equipamiento deportivo), Resinas Fenólicas (mangos de cuchillos, placas de circuitos) (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

Las dos familias de plásticos, termoplásticos y termoestables, requieren maquinaria de trituración, densificación, lavado, y procesado muy diferente, por lo que las industrias dedicadas al reciclado y transformación de los plásticos necesitan adquirir tecnología y especialización en dicho proceso.

2.3. Tereftalato de polietileno (PET)

El polietilentereftalato es un poliéster, comúnmente llamado PET perteneciente al grupo de los termoplásticos y es obtenido a partir de una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico (TA) y el etilenglicol, o también se lo puede obtener en la reacción del Dimetil Tereftalato (DMT) con el etilenglicol (Cobos, 2017; Vichique Tecalco, 2010).

El PET es denominado un material no renovable que se obtiene mediante la transformación del petróleo crudo. Es un plástico muy re-valorizable debido a su factibilidad de reciclado y reutilización, siendo el plástico n° 1 en reciclado en el mundo y es considerado un polímero no contaminante e inerte, aunque recientes estudios exponen leves niveles de toxicidad (Canale, 2015).

En la síntesis del PET se emplean pequeñas fracciones de sales de antimonio (sb), que termina apareciendo en la masa plástica y bajo ciertas condiciones pasa al líquido contenido en envases de este plástico. Sin embargo, no genera sustancias tóxicas al incinerarlo a elevadas temperaturas como ocurre con el PVC y PUR. Su disposición final es un punto crítico, puesto que se observa botellas plásticas en ríos, drenajes y océanos, ocasionando problemas de obstrucción en canales y arroyos y por ende propiciando inundaciones en áreas

mal drenadas. Al igual que otros materiales plásticos, al final de su vida útil, su inercia química resulta en alta resistencia a la degradación por exposición al oxígeno del aire o a radiaciones UV del sol, e incluso a acciones de microorganismos, ocasionando que se presenten por un largo periodo de tiempo como residuos (Canale, 2015).

Inicialmente el PET se utilizaba como fibra para la elaboración de textiles, pero poco a poco sus usos y aplicaciones se fue incrementando, especialmente en la industria de alimentos, debido a sus propiedades de resistencia a impactos, por su impermeabilidad a gases, su baja densidad, las mismas que le permitieron cumplir exigencias de envases para el transporte y almacenamiento de alimentos (Bustamante, 2012).

Según la NTE INEN 2634:2012, el código de resina del polietileno de baja densidad, está determinado como un símbolo triangular, conformado por tres flechas indicadoras de reciclaje, cuyo centro lleva una enumeración específica que indica el tipo de plástico, tal como se indica en la Tabla 1.

Todos los plásticos en su mayoría poseen dicha enumeración, impresa en la parte inferior de la botella.

Tabla 1. Clasificación de los plásticos según la SPI.

NÚMERO	ABREVIATURA	NOMBRE COMPLETO
1	PET(en inglés PETE)	Polietilentereftalato
2	PE-AD (en inglés HDPE)	Polietileno de alta densidad
3	V,PVC	Vinilo, Policloruro de vinilo
4	PE-BD(en inglés LDPE)	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU). Acrolonitrilo-butadienestireno (ABS). Policarbonato (PC). Biopolímeros

Fuente: (INEN, 2012).

2.3.1. Propiedades del PET

El teraftalato de polietileno se le conoce por ser un plástico sumamente puro, muy resistente y transparente. Los plásticos PET pueden tener diferentes presentaciones y se diferencian por presentar diferentes pesos moleculares y cristalinidad. Los plásticos de bajo peso molecular se los denomina grado fibra, los plásticos de peso molecular medio se les conoce como grado película, y los plásticos de mayor peso molecular se los denomina grado ingeniería (Canale, 2015).

A nivel general el teraftalato de polietileno presenta las siguientes características y propiedades (Canale, 2015; Vichique Tecalco, 2010):

- Se puede procesar mediante sistemas de soplado, inyección y extrusión
- Se pueden producir una diversidad de materiales como botellas, películas, laminas y piezas.
- Es transparente y se puede obtener un efecto óptico como la lupa.
- Es muy resistente al desgaste por fricción y colisión.
- Posee grandes propiedades de deslizamiento.
- Es muy resistente a compuestos químicos y al calor.
- Presenta propiedades de impermeabilización, impidiendo el paso de CO₂, O₂ y humedad.
- Tienen alta demanda en su reciclaje y es re valorizable, teniendo una alta relación de costo/beneficio.
- Cumple con exigencias para estar en contacto con alimentos.

- Se puede esterilizar mediante rayos gama y óxidos de etileno.

2.3.2. Aplicaciones del PET

El PET es un material termoplástico de empaque más usado, generalmente sus aplicaciones más notables son las botellas de bebidas gaseosas y bandejas para alimentos para uso en microondas. Para la mayoría de los usos se requiere que el PET tenga una estructura molecular orientada, esto aumenta significativamente la resistencia a la tracción y reduce la permeabilidad a los gases y la transmisión de vapor de agua. Para usos en Packaging, el PET se procesa por soplado y extrusión de film (Canale, 2015; Hermida, 2011; Vichique Tecalco, 2010).

El PET presenta varios usos y aplicaciones, entre los cuales tenemos (Canale, 2015; Klein, 2014):

- Envases y empaques. – por sus cualidades de resistencia, al actuar como barrera frente a gases, el plástico PET abarca casi en su totalidad los mercados de las botellas plásticas ya sean retornables o no, usadas principalmente como envases para bebidas gaseosas, debido a sus cualidades de durabilidad y resistencia a la humedad. El PET en forma de film se utiliza como envoltorio para empaques de alimentos, pues se tiene la ventaja de que el plástico PET mantiene las propiedades del alimento sin causar efectos de toxicidad.
- Electro-electrónica. – en esta categoría se consideran a los plásticos en forma de película, las cuales poseen diversas aplicaciones partiendo desde películas ultra delgadas utilizadas en capacitores electrónicos hasta películas con dimensiones de 0.5 milímetros usadas como aisladores para bobinados en motores.

- Industria textil. – en la industria textil se le conoce como fibra poliéster y es utilizada para elaborar telas y posteriormente crear prendas de vestir que tienen la particularidad de ser resistentes a arrugarse.
- Industria automotriz. – en esta industria se utiliza el PET para fabricar herramientas y repuestos de alta resistencia y de buena estabilidad dimensional.
- Otras aplicaciones para las que se utiliza el PET se puede observar en las cerdas con las que se fabrican las escobas y cepillos, también se los encuentra en moldes para hornos y microondas. Este tipo de aplicaciones, menos exigente en cuanto a la calidad del plástico, lo hace muy apto para pequeños emprendimientos de recicladores urbanos.

2.4. PET como residuos plásticos

La facilidad que tienen los plásticos para su disposición en el mercado, ha generado que cada vez se eleve su demanda y su utilización a nivel mundial, ya que su uso ha llegado a abarcar y ser utilizado para todo tipo de mercadería. Hoy en día, no podemos encontrar un solo producto que no sea cubierto o que no sea protegido por plástico. Esto, ha permitido que se genere un aumento progresivo en su uso, y como consecuencia se ha incrementado la generación residuos plásticos siendo difícil su tratamiento; y provocando una contaminación en el ambiente incontrolable (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Téllez, 2012; Vichique Tecalco, 2010).

2.4.1. Impactos del PET

Se estima que para la fabricación de 1 Kg de PET (amorfo) se emiten 2.7 kg de CO₂ eq, y para obtener 1 Kg de PET (grado para botellas) se emiten 3 kg de CO₂. La energía

embebida en la producción primaria de PET es de entre 81 y 89 MJ/kg, y para fabricar 1 kg de material se precisan entre 14 y 44 L de agua (Canale, 2015).

De acuerdo a ciertos estudios comparando fuentes prístinas de agua con el agua embotellada en PET, señalan que las botellas de plástico liberan continuamente antimonio por lixiviación en el agua que contienen. Sin embargo, las cantidades encontradas en diversos estudios de lixiviados no resultan significativas respecto de una potencial afectación a la salud humana (Canale, 2015).

2.4.2. Riesgos a la salud de las personas y al ambiente

A pesar de que investigaciones aseguran que el plástico PET es inerte frente al ambiente, es decir no se producen contaminantes; pero si se puede observar un impacto visual debido a su acumulación irresponsable en la superficie terrestre que posteriormente llegan a fuentes hídricas a causa de la mala disposición de los plásticos provenientes de las personas. La gestión de los residuos plásticos también se dificulta cuando estos son mezclados con otro tipo de residuos como, por ejemplo, plásticos con restos de materia orgánica, los mismos que son difíciles darles un tratamiento y ser reutilizado o transformados (Cobos, 2017; Téllez, 2012).

El principal problema que nace de los residuos plásticos arrojados y acumulados en la superficie terrestre o fuentes hídricas es su lenta degradación en el entorno a pesar de no generar contaminantes, pudiendo resistir miles de años, lo que no ocurre con los restos de residuos como el papel, cartón o incluso el metal que se degrada por oxidación en menos tiempo (Rejas, Carreón, & Ortiz, 2015; Romero Moreira, 2017; Vichique Tecalco, 2010).

Mediante la tecnología se ha buscado obtener plásticos menos densos y más biodegradables, pero aun así, no se ha visto una eficiencia en la reducción volumétrica principalmente de botellas PET, por lo que se ha visto mucho más eficaz y rentable el reciclado mecánico, y que dicho método ha incrementado en los últimos años gracias a que se ha visto como un fuente de trabajo para personas que no disponen de un empleo fijo (Romero Moreira, 2017; Téllez, 2012).

2.5. El Reciclaje de los plásticos

Cuando se habla del reciclado del plástico, significa su recuperación y su procesamiento o reutilización cuando su vida útil ha culminado y ser utilizado en nuevas aplicaciones (Tapia, 2014).

Es por ello que, apenas el 2% de los residuos reciclados se los reutiliza nuevamente para el fin por el que fue creado en este caso, para almacenar alimentos. La mayoría de los plásticos reciclados se reutiliza como materia prima para la creación de nuevos materiales, puesto que estos no pueden ser reutilizados para alimentos por las normas de calidad y sanidad que se exige hoy en día en el mercado mundial de alimentos (Arandes, Bilbao, & López, 2013).

Dependiendo del tipo de plástico, se pueden transformar a otros productos como por ejemplo, el las botellas PET se los transforma a fibras y estos posteriormente se los utiliza para formar prendas de vestir, los plásticos de PVC se los transforma para formar suelas de zapatos, el PS sirve como materia prima para la producción de concreto liviano, el PE se utiliza para obtener plástico film agrícola y finalmente el PP que se encuentra en autopartes se los transforma para obtener otros componentes automotrices (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Vichique Tecalco, 2010).

Se debe acotar que el PET reciclado, llamado RPET no es apto para ser utilizado nuevamente en la fabricación de envases para bebidas y alimentos ya que no tolera las altas temperaturas con las que debe ser tratado, es por eso que se utilizan técnicas de “súper limpieza” para asegurar la utilización de los mismos (Canale, 2015).

Las botellas PET no se los puede depositar en rellenos sanitarios ni vertederos de basura debido a su impacto visual y su bajo grado de compactación, por lo que conllevaría que un relleno sanitario se sature rápidamente (Arandes et al., 2013).

2.5.1. Situación del PET en el mundo

Se estima que el consumo de plásticos a nivel mundial aumenta en un 4% cada año. Esto, debido al desarrollo tecnológico y su ampliación en el mercado para la obtención de productos como envases, textiles, y muchos otros objetos de uso común. Motivo que ha ocasionado el incremento de 10 M a 60 M de toneladas métricas en la producción de materiales plásticos desde el año 1978 al año 2000, siendo los países de USA, España y Japón a los que les corresponde su consumo en un 50% (Arandes et al., 2013).

El alto consumo de los envases PET en el mundo, ha ocasionado que se instalen nuevas plantas de producción de estos, alrededor de todo el mundo, con la intención de abastecer la alta demanda y poder lograr producir 19.8 millones de toneladas de PET anuales. Esto ha generado un desafío para la población e industria mundial que busca soluciones para controlar la generación de desechos plásticos, acogiendo como primera opción su recuperación, implementando sistemas de reciclaje y así, reducir su impacto al medio ambiente (Vichique Tecalco, 2010).

Debido al incremento anual de PET, utilizado principalmente para envases y visualizando sus impactos, en los países a nivel del mundo se han creado organizaciones públicas y privadas quienes se encargan a la recuperación y reciclaje de botellas PET desechadas después de consumir su producto (Romero Moreira, 2017; Téllez, 2012; Vichique Tecalco, 2010).

La innovación de la tecnología desarrollada especialmente para tratar problemas del PET, ha podido generar envases con baja densidad manteniendo siempre su calidad y resistencia, lo que le ha permitido crear nuevos campos de aplicaciones y por ello aumentar el índice de consumo mundial, llegando a incrementar su demanda de 6% cada año, el mismo que mediante estudios se mantendría hasta el año 2025 (Vichique Tecalco, 2010).

Informes del Banco Mundial aseguran que en el año 2025, en ciudades grandes se llegaría a producir un volumen de 2.200 millones de toneladas de residuos sólidos anuales, y que cuyo peso de basura originada en un día se asemejaría al peso de la Gran Pirámide de Giza (González & Muños, 2016).

Gracias a los sistemas de reciclado de residuos como plásticos, papel y cartón en América Latina y el Caribe, alrededor de 4 millones entre hombres y mujeres se benefician económicamente como sustento familiar (IRR, 2015).

2.5.2. Situación del PET en el Ecuador

Según el INEC, menciona que entre los años del 2010 hasta el 2016, la clasificación de los residuos en los hogares ha aumentado, siendo el 2016, el año que mayor se ha reciclado con un 41.5% a comparación del año 2013 que es el año que menor cantidad de residuos se recolectó en el país con un 22.7% (Romero Moreira, 2017).

En el Ecuador, diariamente se producen alrededor de 11 mil toneladas de residuos sólidos urbanos, llegando a una generación anual aproximada de 4 millones de toneladas de residuos. Del total de residuos sólidos urbanos producidos, solo el 25% son residuos reciclables, en donde el papel y cartón ocupan un 9.4%, el plástico un 11%, vidrio 2.6%, chatarra 2.2%. La recolección de mencionados residuos, ha permitido que esta acción se considere como una fuente de ingresos económicos. Es por ello, que se han desarrollado 3283 empresas encargadas del reciclado y clasificación de residuos, brindando más de 50 mil puestos de empleos y contribuyendo en la disminución de los impactos al ambiente (IRR, 2015; Romero Moreira, 2017).

La industria de reciclaje del país permite ahorrar alrededor de 77 millones de dólares anuales, en conceptos de importación de materia virgen; valores de los cuales solo el 5% corresponde a plástico. El SRI menciona que en el año 2012 se recaudó alrededor de 14 millones de dólares, gracias a la recuperación de 1.1 millones de botellas PET. Esta recuperación ha permitido que no se fabriquen nuevos envases, logrando así, una disminución aproximada de 112 mil toneladas de dióxido de carbono (CO₂). En el 2016 se recaudó alrededor de 28 millones dólares, teniendo en cuenta que estos valores corresponden solo a los centros de acopio y recicladores que poseen permisos o certificaciones otorgados por el Ministerio de Industria y Productividad, MIPRO (Romero Moreira, 2017).

Gracias a la aprobación de la Ley de Fomento Ambiental y Optimización de los Ingresos del Estado en el año de 2011 y entrando en vigencia el año 2012, el reciclado de las botellas PET, fue rápidamente acogida por las personas a nivel nacional, gracias a sus imposiciones de cobrar impuestos a botellas no retornables, con el principal objetivo de

disminuir la contaminación ambiental, la generación de empleo e incrementar el reciclaje de las botellas PET (IRR, 2015).

Esta Ley se aplicó en todas las regiones del país, las cuales, en coordinación con algunos sectores, se controla el cumplimiento de los lineamientos de mencionada ley. Estos organismos son (IRR, 2015):

- Gobierno Central: es la entidad que controla y administra el cumplimiento de la normativa ambiental en conjunto con el SRI quienes se encargan de cobrar los impuestos concordados, el MIPRO el cual otorga el permiso y certifica a centros de acopio de las botellas PET y el MAE quien acredita a los gestores ambientales.
- Las empresas embotelladores, importadoras y los centros de acopio se coordinan para que mediante la recuperación se les pueda reconocer económicamente a los recicladores y brindarles material de trabajo para el correcto reciclaje y almacenamiento de las botellas PET.
- Industria de Reciclaje aplicaran las medidas mediante la acción correcta de reciclaje y se basaran en la ley para el correcto reproceso de las botellas PET.
- Los recicladores de base, quienes son los encargados de la recuperación de botellas PET, deben reconocer que tipo de botellas se deben recolectar y cuales no para su posterior entrega a los centros de acopio que posean los requisitos necesarios.

La aplicación de esta Ley ha permitido elevar la cantidad de botellas PET recuperadas o recicladas, pues el 2011 previo a la aplicación de ley solo se recolecto 8520 toneladas de botellas PET, y en el año 2012 cuando la ley entró en vigencia, se registró un incremento del 333% permitiendo reciclar 28401 toneladas de botellas PET y en los siguientes dos años se

recuperó 48384 toneladas equivalente a 1935 millones de botellas PET teniendo una eficiencia del 170% desde el 2012 al 2014 (IRR, 2015).

2.6. Métodos de reciclado de residuos plásticos

Los métodos más conocidos relacionados al reciclado de los residuos plásticos son: Reducción en la fuente, Primarios, Secundarios, Terciarios y Cuaternarios.

2.6.1. Reducción en su fuente

La reducción en la fuente se refiere a las decisiones o cambios que deben adoptar las industrias quienes crean el envase con el fin de generar menos emisiones, utilizando menos recursos energéticos, o materia prima. Otra opción, es el uso de materia prima alternativa para obtener envases que se degraden en menos tiempo o que tengan menor densidad pero que sean resistentes. Este método se puede emplear en las industrias petroquímicas que fabrican el polímero, también en las industrias quienes transforman el polímero a plástico para los diferentes usos. De igual manera, se lo puede ejecutar en la industria diseñadora del envase final, quienes dan la forma, volumen o densidad, dependiendo del producto que va a contener (Vichique Tecalco, 2010).

En otras palabras, la reducción en la fase productiva, se refiere al desarrollo tecnológico en el que se busca ocupar menos materia prima, pero manteniendo siempre las propiedades físicas de resistencia, característico de los envases plásticos.

2.6.2. Reciclado mecánico o tratamiento primario

El reciclado mecánico consiste en operaciones o procesos mecánicas por las que los plásticos son sometidos; como por ejemplo el lavado de los envases, con el fin de obtener un producto similar reciclado, manteniendo siempre sus características y propiedades para las

que fue creada. Esta opción se lo practica principalmente en plantas encargadas de producción y transformación de plásticos, pero se lo practica en un porcentaje muy bajo (Arandes et al., 2013; Téllez, 2012).

2.6.3. Tratamiento secundario

Este tratamiento es el que actualmente se utiliza en mayor porcentaje especialmente en la industria automotriz. Consiste en aprovechar las propiedades de los termoplásticos, considerando que se pueden fundir con la temperatura, y poder obtener nuevos productos para diferentes usos, aunque se debe aclarar que solo el 20% de los plásticos se pueden reciclar de esta forma y que su pureza es inferior al plástico original (Vichique Tecalco, 2010).

2.6.4. El reciclado terciario o reciclado químico

Este método consiste en aprovechar los componentes constitutivos del plástico llamado monómeros y transformarlos en un hidrocarburo. El producto obtenido puede ser utilizado para obtener nuevos polímeros o se pueden aprovechar en la industria petroquímica. El método de reciclado químico consiste en transformar el plástico mediante transformación química o térmica, dependiendo de que producto se desea obtener y el tipo de plástico a utilizar (Arandes et al., 2013).

2.6.5. El reciclado cuaternario

Este método consiste en recuperar el poder energético del plástico mediante su incineración. Actualmente este proceso es muy cuestionado debido a conceptos de daños medioambientales causado por las emisiones generadas (Arandes et al., 2013; Téllez, 2012).

2.7. Reciclaje químico

Es el proceso mediante el cual, ocurre la descomposición de los materiales poliméricos de los plásticos, permitiendo recuperar sus componentes iniciales de partida (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017).

El reciclaje químico o de materia prima es una serie de etapas, en las cuales las moléculas que constituyen a los polímeros son rotas o craqueadas, para nuevamente obtener sus materiales iniciales como los monómeros. Se usa para producir productos hidrocarbonados que pueden ser utilizados en la producción de nuevos polímeros, productos químicos refinados o combustibles (Arandes et al., 2013; Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

Esta alternativa de reciclado conduce a un amplio número de productos, dependiendo de los factores físicos en las que se trabaje (agente despolimerizante, temperaturas de reacción, presión). Reportándose el uso de esta tecnología con el fin de la obtención de los materiales de partida para la regeneración del polímero y manufactura de productos especiales de baja o media masa molecular (polioles), usados en la síntesis de poliuretanos, resinas de poliéster, aditivos para varias aplicaciones, entre otros (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Tapia, 2014).

Existe una variedad de tratamientos químicos que pueden incluirse en esta categoría como la despolimerización química, pirólisis, hidrogenación, gasificación, el craqueo térmico y la conversión catalítica (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017):

- Pirólisis: es un proceso térmico en la cual el craqueo de los plásticos o polímeros se lo realizan en ausencia de oxígeno, pudiendo obtener hidrocarburos con una alta pureza y que se pueden reprocesar en refinerías.
- Hidrogenación: trata de un proceso en la cual los plásticos reciclados son procesados en altas temperaturas en presencia de hidrógeno, permitiendo que las moléculas se rompan, obteniendo un petróleo sintético útil para refinerías y plantas petroquímicas. Para este proceso no es necesario la clasificación de los plásticos.
- Gasificación: es un proceso térmico, en donde sus reacciones de despolimerización se los realiza con un agente gasificante como el oxígeno en bajas concentraciones, permitiendo que los plásticos tengan una combustión incompleta para poder obtener principalmente gases como CO₂, CO, metano entre otros, los cuales se pueden condensar y obtener un hidrocarburo o bien utilizarlo para generar electricidad mediante motores.
- Quimiólisis: es un proceso que se basa en la aplicación de procesos de hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y procesarlos para obtener sus componentes monomérico para posteriormente reprocesarlos y obtener nuevos plásticos. En este proceso se utilizan plástico que estén compuestos por poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas.
- Metanólisis: son procesos que requieren de sistemas muy sofisticados, los cuales se basan en la despolimerización del PET mediante reacciones con metanol para separar sus componentes básicos como el etilenglicol y demetiltereftalato y que se pueden nuevamente repolimerizar para obtener un tipo de resina puro.

Estudios realizados aseguran que los componentes monomérico que se obtienen en los diferentes procesos del reciclado químico son altamente puros y se pueden reprocesar para obtener nuevas botellas PET (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

2.7.1. Pirólisis

La pirólisis es un proceso que parte de la descomposición química de un material mediante la aplicación de altas temperaturas comprendidas entre 300 y 500 °C en ausencia de oxígeno. Los tres productos principales que se producen durante la pirólisis son petróleo, gas, carbón, que tienen un valor muy significativo para las industrias, especialmente para la producción y refinerías (Rejas et al., 2015; Sharuddin, Abnisa, Daud, & Aroua, 2018).

Los gases que se generan en este proceso conocido como gas de síntesis se los recolecta y posteriormente se los condensa para formar un destilado con características similares a un hidrocarburo. Dicho producto presenta bajas concentraciones de azufre, y que mediante un proceso de destilación se logra obtener hidrocarburos puros como la gasolina, diésel y querosén. Este método ha recibido un visto positivo por investigadores ya que contribuye a reducir la cantidad de CO₂ en la atmosfera (Rejas et al., 2015).

La pirólisis fue elegida por muchos investigadores dado que el proceso puede producir altas cantidad de aceite líquido logrando hasta un 80% en peso a temperatura moderada alrededor de 500 °C. Además este proceso es muy flexible ya que los parámetros del proceso pueden manipularse para optimizar el rendimiento del proceso según las preferencias (Sharuddin et al., 2018).

Generalmente, el proceso de pirólisis requiere del control de algunos factores para lograr una correcta reacción en el reactor de gasificación como son: la composición

estructural de la materia prima, tipo de gasificador utilizado, temperatura en la que se desarrolla el proceso, el tiempo en el que la materia prima es sometida a dicha temperatura y la velocidad de condensación de los gases (Pinedo, 2013).

2.7.1.1. Materia prima

Es primordial tener en cuenta el tipo y la calidad de la materia prima que se utiliza en el proceso de pirólisis, pues de estos depende la eficiencia y la calidad del producto obtenido.

2.7.1.2. Temperatura

La temperatura determinara el grado o la velocidad de descomposición térmica de los plásticos, El proceso de pirólisis de los plásticos empiezan a partir de los 300 °C. pues a temperaturas mayores a 600 °C se obtienen mayor cantidad de moléculas gaseosas, mientras a temperaturas menores de 400 °C se va a obtener líquidos más viscosos (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

2.7.1.3. Presión

La presión es un punto muy significativo, ya que este factor afecta, tanto al rendimiento del proceso como a su producto final. 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 evaporados. Se debe considerar que, mientras mayor presión se genere mayor energía se requiere. En el caso de pirólisis, los altos puntos de presión incrementa la producción de gases no condensables y disminuye el rendimiento en la producción de productos líquidos (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

2.7.1.4. Velocidad de calentamiento

Se pueden realizar distintos tipos de procesos de pirólisis, los cuales están ligados a la velocidad de calentamiento para llegar a la temperatura requerida y el tiempo de residencia, los cuales se puede clasificar tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y temperatura y los productos obtenidos de interés en cada una de ellos.

PROCESO	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRODUCTOS
CARBONIZACION	Días	Muy lenta	400	Bio-char
CONVENCIONAL	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
RAPIDA	0,5-5 s	Muy rápida	650	Bioaceites
FLASH (LÍQUIDO)	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites
FLASH (GAS)	< 1 seg	Rápida	< 650	Químicos y gas
ULTRARAPIDA	< 0,5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
VACIO	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
HIDROPIRÓLISIS	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
METANOLISIS	< 10 seg	Rápida	>700	Químicos

Fuente: (Pinedo, 2013).

2.7.1.5. Tipo de reactores pirolíticos

El reactor pirolítico es el lugar donde ocurren las reacciones químicas de despolimerización y degradación térmica de la materia prima. Los reactores de pirólisis se clasifican en 3 tipos: discontinuo o batch, semi-continuo o semi-batch y continuo o tubular (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017):

- Los reactores tipo batch consiste en un tanque donde se coloca la materia prima a degradar en el interior al iniciar el proceso, luego se deja reaccionar por un tiempo determinado conocido como tiempo de residencia, que es el tiempo en el que la materia prima en este caso los polímeros son sometidos a la temperatura requerida.
- En el reactor de tipo semi-batch los materiales que se van a ser pirolizados son alimentados del comienzo del proceso, los productos generados se van retirando de manera continua.

- El reactor tipo tubular o continuo es un reactor que posee un flujo constante tanto en su alimentación con materia prima como en la salida de los productos.

2.7.2. Proceso de reacción pirolítico

El proceso de despolimerización de los plásticos inicia con la rotura de los enlaces químicos, bajo calor debido a que él ocurre una reacción de disociación de sus enlaces. Los polímeros son muy sensibles térmicamente debido a la limitada resistencia de los enlaces covalentes que forman su estructura (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017). El mecanismo de despolimerización de los plásticos se da en las etapas de iniciación, propagación y terminación (Crespo Palma, 2013).

La iniciación consiste en la rotura inicial del polímero, puede ocurrir en posiciones aleatorias o en la cadena final, según como se indica en la Figura 1 (Crespo Palma, 2013; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

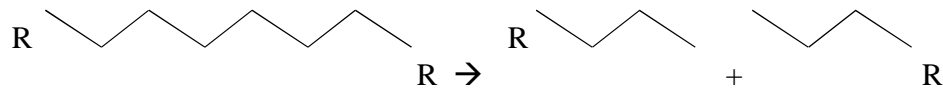


Figura 1. Escisión de la cadena polimérica.

Fuente: (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

- Escisión de cadena final. – también se lo denomina proceso de depolimerización. El polímero rompe a partir de los grupos terminales produciendo sucesivamente los monómeros correspondientes (Crespo Palma, 2013; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).
- Escisión de cadena aleatoria. – La cadena se rompe en puntos aleatorios, permitiendo que se generen varios fragmentos de longitud variada, generalmente más largos que las unidades monoméricas (Crespo Palma, 2013).

En la etapa de propagación se liberan los fragmentos monómeros olefínicos y se pueden dar en varias reacciones. Una de ellas, consiste en la liberación de fragmentos monoméricos olefínicos a partir de la rotura en posición β del radical primario que se formó en la etapa de iniciación, lo que permite obtener un monómero proveniente del material degradado y un nuevo radical, tal como se muestra en la Figura 2 (Crespo Palma, 2013; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).



Figura 2. Escisión β de radical primario.

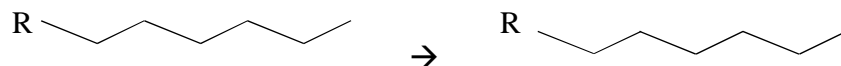
Fuente: (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

El nuevo radical formado debe pasar por un proceso de estabilización mediante la transferencia de un hidrógeno, la misma que puede ser inter o intra-molecular, y para ello existen 2 posibles rutas, las cuales se muestran en la Figura 3 y 4 (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

Ruta 1

- a. Transferencia intermolecular del hidrógeno de la cadena. – es un proceso en el cual, un hidrógeno de un carbono se cambia a otro carbono de la misma molécula.
- b. La escisión de 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.

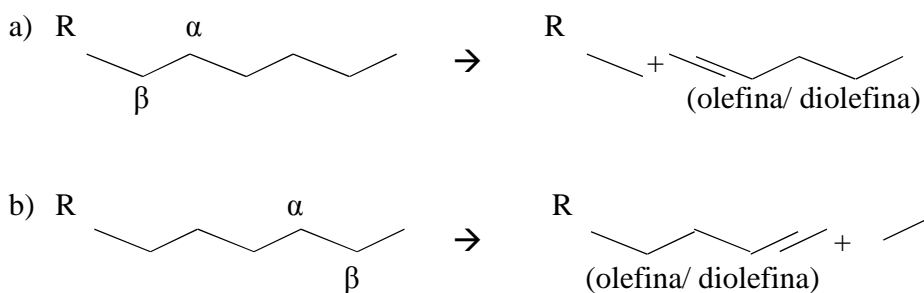


Figura 3. Ruta 1 de la estabilización del radical secundario.

Fuente: (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

Ruta 2

- a. La transferencia intermolecular de hidrogeno. – es la abstracción de un hidrógeno de una cadena cercana y como resultado da un compuesto saturado.

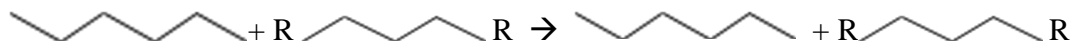


Figura 4. Transferencia Intermolecular de hidrógeno.

Fuente: (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

En el proceso de transferencia intra-molecular, el polietileno posee mayor ventaja debido a que contiene altas cantidades de hidrogeno en las moléculas de polímeros que se desee degradar.

Finalmente, en la etapa de finalización se producen reacciones de recombinación de radicales. Estas reacciones pueden ser (Crespo Palma, 2013):

- Modo bimolecular. – en esta reacción se unen dos radicales para formar una nueva molécula.

- Desproporción. – es la reacción en donde dos radicales se involucran para formar un alcano y una olefina.

2.7.3. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que se somete los residuos sólidos a altas temperaturas en un ambiente pobre en oxígeno para impedir que se realice una combustión inmediata de la materia (Borge & Agudelo, 2010; Tangri, 2017).

La temperatura en las que ocurre las reacciones de gasificación están entre los 500 y 900 °C, en las cuales se utiliza agentes gasificadores como aire, O₂, vapor de agua, CO₂, o mezclas de estos componentes (AGRO WASTE, 2013; FAO, 2014).

El producto es un combustible llamado gas de síntesis, o syngas, de la cual, sus principales aplicaciones se basan para la generación de calor y energía eléctrica. La composición del gas de síntesis está integrada por CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄ y pequeñas concentraciones de hidrocarburos pesados como son el etanol (C₂H₆), metanol, FT diésel y el etileno (C₂H₄). El sustrato carbonoso o materia prima utilizada junto con el agente gasificador son los factores principales que intervienen para lograr un syngas de menor o mayor poder (AGRO WASTE, 2013; Arteaga Pérez & Casas Ledón, 2015; FAO, 2014).

En el proceso de gasificación se consideran algunos factores los cuales intervendrán en el correcto proceso y reacciones químicas que ocurran en el reactor como son (AGRO WASTE, 2013):

- Agente gasificante: Aire, oxígeno, vapor de agua, CO₂, H₂.
- Temperatura y Presión en las que ocurre las reacciones en el reactor.

- Tipos de gasificadores: pueden ser gasificadores de lecho fijo y gasificadores de lecho fluido.
- Transporte neumático, sistemas combinados o circulantes, horno rotatorio, etc.
- Fuente de calor: puede ser por métodos directos o indirectos.
- Forma de incorporación de la materia prima: alimentación superior o alimentación inferior.

2.7.3.1. *Agente gasificante*

El agente gasificante varía de acuerdo a lo que se desea obtener. Al utilizar aire, el producto gaseoso posee un bajo contenido de poder calorífico, si se utiliza un agente oxidante como O₂, se puede obtener un poder calorífico entre 10 y 18 MJ/m³, tres veces más que al utilizar aire. Utilizando H₂ se puede obtener un gas con un poder calorífico muy alto, e incluso se puede utilizar como sustituto del gas natural (AGRO WASTE, 2013; Martillo Aseffe, Lesme Jaén, Martínez González, Oliva Ruiz, & Orozco Cantos, 2019).

Al utilizar el vapor de agua en el proceso de gasificación, mejora el rendimiento global para producir syngas y obtener metanol o gasolina sintética (Borge & Agudelo, 2010).

2.7.3.2. *Tipo de gasificadores*

Los gasificadores se clasifican según el sistema que se utiliza en el reactor para que entre en contacto la materia sólida y el agente gasificante. Se pueden agrupar en tres tipos (AGRO WASTE, 2013; Arteaga Pérez & Casas Ledón, 2015; Martillo Aseffe et al., 2019):

- Gasificador de lecho fijo. – en este reactor las fases de reacción ocurren dependiendo del flujo de la materia y el agente gasificante, estos pueden ser de flujo ascendente (updraft) y descendente (downdraft).

- Gasificador Updraft. – en este gasificador existen tres zonas que son en donde se realizan las diferentes reacciones de craqueo de las moléculas de la materia como son las etapas combustión parcial, reducción y pirólisis. El agente gasificante ingresa por la parte inferior en forma de corriente, syngas es evacuado por la parte superior del reactor. Este reactor presenta la desventaja de que el gas producido no se lo puede producir en forma continua, ni se puede utilizar en motores de combustión interna debido a que el gas contiene altas concentraciones de alquitrán.
- Gasificador Downdraft. – en este reactor la velocidad de calentamiento para lograr su temperatura adecuada demora entre unos 20 y 30 minutos; el agente gasificante ingresa por la parte media y el gas producido se lo conduce por la parte inferior del reactor, presentando algunas complicaciones como la presencia de cenizas o agua. Este modelo de gasificador es de mayor utilización en motores de combustión interna y turbina de gas.
- Gasificador de lecho fluidizado. – es un reactor mucho más eficaz que los anteriores, permite un excelente mezclado de las fases gaseosas en una misma aérea y mantiene las temperaturas uniformes en el reactor. Es un reactor muy eficaz, ya que el componente gaseoso contiene concentraciones muy bajas de alquitranes.
- Gasificador de arrastre. – se utilizan para integrar la masa en ciclos combinados. Se usa material pulverizado previamente y al ingresar se mezcla con agua el cual entra en contacto con el agente gasificador en el interior del reactor. Se utiliza a gran escala para convertir carbón, coque de petróleo y residuos de refinería.

2.7.3.3. Presión y temperatura

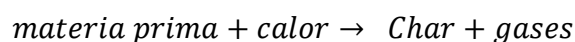
La presión y temperaturas son parámetros que permiten determinar la eficiencia del reactor, con el fin de que se realicen las mejores reacciones y poder obtener los productos deseados. Se puede trabajar desde 1 bar a 30 bares, considerando que, mientras mayor presión se produzca en el reactor, mayor cantidad de hidrocarburos líquidos se puede obtener. Al trabajar con temperaturas elevadas favorece a la obtención en mayor proporción de componentes gaseosos, menor contenido de alquitranes y una mejor conversión de carbón a gas (AGRO WASTE, 2013; Martillo Aseffe et al., 2019).

2.7.4. Proceso de reacción en gasificación

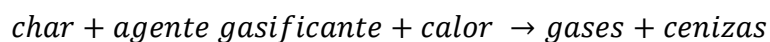
En el proceso de gasificación se pueden presentar una serie etapas: secado, pirólisis, combustión parcial, craqueo de gases, alquitranes y gasificación de los productos finales que están integrados por CO_x, CH₄, H₂ y (C₂+C₃) (Arteaga Pérez & Casas Ledón, 2015).

En resumen el proceso ocurre de la siguiente manera (AGRO WASTE, 2013; Martillo Aseffe et al., 2019):

Pirólisis



Gasificación



El proceso de pirólisis se da cuando la temperatura es superior a los 400 °C dando como resultado un residuo carbonoso o conocido como char, que corresponden a componentes como carbón y gases condensables (hidrocarburos pesados y ligeros) y no condensables. Las

reacciones de gasificación ocurren cuando la temperatura es mayor a 500 °C, donde se generan reacciones heterogéneas y homogéneas, en las reacciones heterogéneas existen reacciones entre el char, el agente gasificante el CO₂ y el H₂; en las reacciones homogéneas los componentes gaseosos formados en el reactor reaccionan entre sí (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017).

Representando esquemáticamente el proceso de gasificación tendría las siguientes rutas, como se muestra en la Figura 5.

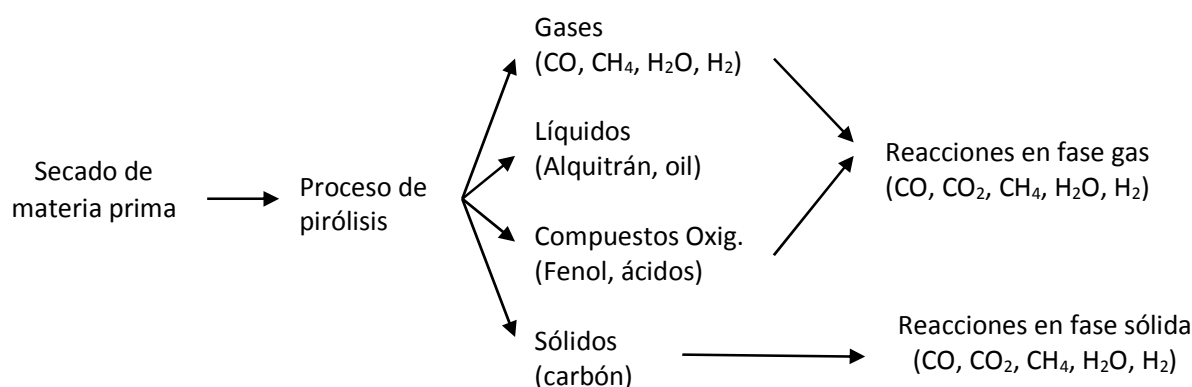


Figura 5. Esquema del proceso de gasificación.

Fuente: (Arteaga Pérez & Casas Ledón, 2015).

2.8. Combustibles

Los combustibles son sustancias de origen natural y artificial, obtenidas mediante procesos realizados por el ser humano. Los combustibles pueden presentarse en estado sólido, líquido y gaseoso que se los puede combinar con oxígeno y obtener mediante reacciones químicas el desprendimiento de calor en forma de fuego. Los combustibles sólidos de origen naturales pueden ser la madera y el carbón mineral, los elaborados por el ser humano puede ser carbón vegetal, aserrín, pellets y cascara de arroz. Los combustibles líquidos naturales es principalmente el petróleo y mediante procesos mecánicos se puede elaborar la gasolina, biodiesel, alcohol. Los combustibles en estado gaseoso natural es el gas

natural y los elaborados son los conocidos GLP y biogás (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Tojes Pacheco, 2015; Vazquez et al., 2016).

2.8.1. Propiedades de los combustibles

Las propiedades y características físicas de los combustibles crudos parten del control de la concentración y estado de las resinas y asfáltenos que integran en su composición.

Las normativas que se deben aplicar para para los análisis fisicoquímicos se puede encontrar en Tabla 1 de norma (INEN, 2015), la misma que se puede observar en el Anexo 3.

Las características físicas que se analizan con regularidad en los combustibles crudos y refinados son (Balseca Sampedro, 2016; Cortés Llerena, 2017):

- El color. – el petróleo puede poseer tonalidades que van desde un color amarillo hasta un color rojo pardo. Aquellos de tonalidad amarillas pueden contener un bajo peso específico que va desde 0.77 a 0.79 g/ml, y son los que mayores propiedades presentan para obtener productos derivados de mayor calidad, los hidrocarburos que poseen una tonalidad ámbar tienen generalmente un peso específico mediano que están entre 0.79 a 0.82 g/ml y finalmente tenemos los hidrocarburos más pesados que normalmente presentan tonalidades oscuras, señal de que la concentración de asfaltos es elevada.
- Densidad. – Es el peso en vacío, (es decir la masa), de un volumen unitario de material, a una temperatura dada.
- Densidad relativa. – Es la relación entre el peso volumétrico de un material a una temperatura T1, y el peso del agua con un volumen similar con una temperatura T2.

- Grados API. – es la gravedad específica utilizada por las refinerías del petróleo, que compara la densidad del petróleo con la del agua a mediante sistemas de cálculo estandarizados. En la industria del petróleo se prefiere un crudo con baja densidad ya que posee mayor concentración de hidrocarburos que pueden convertirse en gasolina (Petroleum, 2015). Debido a que la densidad es una medida de peso volumétrico, los °API se pueden utilizar para calcular cuántos barriles de crudo se pueden extraer de una tonelada métrica de un determinado petróleo (Petroleum, 2015).
- Viscosidad absoluta. – la viscosidad es la resistencia de una sustancia en fluir en una superficie a una velocidad constante en un espacio determinado.
- Viscosidad cinemática. – es la relación entre la viscosidad y la densidad de la muestra; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo la acción de la gravedad. En el SI, la unidad de la viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m^2/s).
- Viscosidad dinámica (coeficiente de). – es la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y el coeficiente de corte; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido. En el SI, la unidad de viscosidad dinámica es el pascal por segundo (Pa.s) (COVENIN 2052, 1993).
- Contenido de humedad. – es muy importante ya que permite determinar la calidad de combustibles sólidos.
- Punto de congelación. – se le conoce como punto de congelación a la temperatura en la cual una sustancia pierde sus últimos cristales de congelamiento cuando es sometida a una fuente de calor.
- Punto de inflamación (Flash Point). – es la temperatura más baja en la cual sus vapores desprendidos son capaces de inflamarse.

- # de octanos/cetano. – también conocida como RON (Research Octane Number) el cual está ligado al tiempo que demora al inyectar un carburante al combustible y su combustión o detonación en un cilindro de motor. Una buena combustión se da cuando ocurre una reacción de ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante.
- Calor específico. – se refiere al calor que se necesita aplicar a una sustancia para incrementar un grado de su temperatura, teniendo en cuenta que los diferentes crudos pueden presentar pequeñas variaciones en su calor específico. Normalmente el calor específico de los crudos disminuye cuando su densidad aumenta. El calor específico de los compuestos pesados incrementa fácilmente con la temperatura y es casi una función lineal de la temperatura (Cortés Llerena, 2017).

Conocer todas estas características es primordial en la industria de los combustibles, principalmente aquellos de la industria automovilística y refinerías.

2.8.2. Espectroscopia del infrarrojo (IR)

La espectroscopia de infrarrojo es una de las técnicas espectroscópicas más utilizadas para estudiar los compuestos orgánicos e inorgánicos donde se analizan las vibraciones moleculares (Elisabeth & Harold, 2014).

La espectroscopia de IR consiste en el que las moléculas de una sustancia rotan y vibran a distintas frecuencias, mediante la absorción de energía proporcionada por fotones en un rango energético de IR. La espectroscopia de IR se puede dividir en: espectroscopia del infrarrojo próximo (4000 a 12500 cm^{-1}), espectroscopia del infrarrojo medio (650 a 4000 cm^{-1}), espectroscopia del infrarrojo lejano (10 a 650 cm^{-1}) (Piqué & Vázquez, 2012).

Las áreas donde se aplica la espectroscopia IR son: biotecnología, ciencias de la tierra, control medioambiental, industria del petróleo, ciencia de los polímeros, etc (Elisabeth & Harold, 2014; McMurry, 2018).

Esta práctica se realiza en equipos especializados conocidos como espectrómetros de infrarrojo o espectrómetro FTIR, estos emiten radiación infrarroja e interacciona con la muestra que se desea analizar que bien puede ser sólida o líquida. Esta interacción genera un espectro en forma de bandas o picos el cual se puede analizar cuantitativamente o cualitativamente. Estas bandas representan dos aspectos en sus ejes, el eje de las abscisas representa la longitud de onda infrarroja (cm^{-1}) y en el eje de las ordenadas se representa el grado de absorción molecular de la sustancia (Mondragón Cortez, 2015; Piqué & Vázquez, 2012).

Todos los espectrómetros tienen tres componentes básicos (Elisabeth & Harold, 2014):

- Una fuente de energía radiante. – las fuentes de radiación deben ser continuas en un amplio intervalo y gran intensidad. La intensidad no debe variar apreciablemente con la longitud de onda.
- Un componente monocromador (instrumento dispersivo) o interferómetro (FTIR) para aislar una banda de energía radiante. – El FTIR, posee un interferómetro que divide el haz de luz, generando una diferencia de trayectoria óptica entre dos haces, que luego son combinados con el fin de producir una señal de interferencia repetitiva medida como función de la diferencia de trayectoria por el detector. El interferómetro produce señales que contiene información del espectro infrarrojo después de pasar a través de la muestra.

- Un detector para medir la energía radiante transmitida a través de la muestra. – para detectar la radiación en el infrarrojo fundamental. Prácticamente todos los espectrómetros de infrarrojo utilizan detectores térmicos de los cuales tres tipos han sido los más empleados. Termopares, que utilizan una unión, termo-sensibles de dos metales distintos para generar un pequeño voltaje cuando cambia la temperatura; bolómetros, que son resistores que cambian su resistencia para variar la temperatura; detectores neumáticos de Golay, que utilizan una cámara de gas que se expande cuando la temperatura aumenta.

Estos detectores difieren especialmente en términos de su tiempo de respuesta y de su dependencia de la longitud de onda.

2.8.2.1. *Información que brinda la espectroscopia IR*

Cada banda formada en el espectro corresponde a un tipo de vibración específica, es decir, cada banda formada representa los diferentes moléculas que han entrado en un estado de excitación o vibración causado por la radiación IR emitida por el espectrómetro (Mondragón Cortez, 2015).

En un espectro IR, existen dos zonas que permiten una mejor interpretación del espectro, en la primera zona, que es en donde se pone mayor énfasis, se identifican los llamados grupos funcionales que están desde los 4000 cm^{-1} hasta los 1400 cm^{-1} ; y la zona denominada zona de la huella dactilar que está desde los 1400 cm^{-1} hasta los 60 cm^{-1} (Carey & Giuliano, 2014; Mondragón Cortez, 2015).

Un grupo funcional es la agrupación de átomos quienes son los responsables del comportamiento de cada molécula que lo compone. Dentro de la química orgánica existen

algunas variaciones en los compuestos, que son el resultado de la hibridación del carbono con diferentes elementos. Tales mezclas presentaran características físicas y químicas diferente entre sí, pues será dependiente del tipo de enlace y elemento con el que combine o enlace el carbono (Pichardo Rubio, 2011).

En la zona de la huella dactilar, la identificación y asignación de cada banda formada a una determinado grupo funcional o molécula es muy complejo, puesto que en esta zona ocurren combinaciones de vibraciones de alargamiento y de flexión correspondiente a cada compuesto, y debido a ello a esta zona se lo denomina región de las huellas dactilares (Mondragón Cortez, 2015).

En la zona de infrarrojo mediado que está comprendida en longitudes de 4000 y 1500 cm^{-1} , se forman bandas que corresponden a vibraciones entre dos átomos de una molécula, principalmente a grupos que contiene átomos de hidrogeno o de grupos con dobles o triples enlaces aislados (Arias Bastidas & Ramirez Bayeh, 2019; Elisabeth & Harold, 2014; Piqué & Vázquez, 2012).

2.8.2.2. *Interpretación de los espectros IR*

La interpretación completa de un espectro IR es muy compleja, debido a que en la mayoría de las moléculas orgánicas poseen un sin número de estiramientos o vibraciones comprendidas entre la molécula y sus enlace, provocando que se generen bandas difíciles de identificarlas (McMurry, 2018; Mondragón Cortez, 2015).

El estado de oxidación de una molécula es el factor primordial que favorece la predicción de la frecuencia de absorción de un grupo inorgánico. Es menos complicado la

identificación de los compuestos cuando se compara el espectro de un producto puro, con el espectro de un compuesto deseado (Mondragón Cortez, 2015).

Cuando se obtiene una nueva sustancia y se desea conocer su composición utilizando el método de espectroscopia IR, se lo debe realizar considerando las siguientes recomendaciones (Mondragón Cortez, 2015):

- Analizar la forma y longitud de las bandas espectrales. – si es una banda muy aguda se trata de un compuesto aromático, si es una banda ancha, se trata de un grupo inorgánico, y si la banda es ancha, se trata de un grupo de enlace de hidrogeno.
- Fijarse en la región comprendida entre 1600 y 2800 cm^{-1} , que es la región donde se pueden encontrar compuestos formados por dobles y triples enlaces como el enlace $\text{C}=\text{O}$ que se forma en la longitud de 1700 cm^{-1} y $\text{C}\equiv\text{N}$ en una longitud de 2050 cm^{-1} .
- Si las bandas son claras y anchas en la longitud de 3500 cm^{-1} se trata de grupos hidroxilo; si las bandas presentan picos fuertes en la longitud de 3300 cm^{-1} se pueden tratar de aminas; si las bandas son agudas y débiles la longitud de 3200 cm^{-1} son alquinos terminales y son alquinos si las bandas son moderadas en 3100 cm^{-1} .
- Si se desea conocer si el compuesto analizado posee funcionalidades aromáticas se debe observar y analizar la región de flexión entre $650\text{-}850\text{ cm}^{-1}$.

2.8.2.3. *Absorciones de grupos funcionales en el IR*

En su mayoría los grupos funcionales tienen bandas comunes de absorción que no varían de un compuesto a otro. La absorción de enlaces de $\text{C}=\text{O}$ de una cetona comúnmente se encuentra en el intervalo de 1680 a 1750 cm^{-1} , los enlaces de O-H característico de un alcohol comúnmente se encuentran en las longitudes de 3400 a 3650 cm^{-1} , los enlaces de $\text{C}=\text{C}$ se forman en las longitudes comprendidas entre 1640 a 1680 cm^{-1} (McMurry, 2018).

En hidrocarburos, las bandas de absorción de los grupos funcionales de un espectro IR formadas por estiramiento en enlace C-H, están ligada a la generación de hibridaciones en el átomo de carbono y debido a ello, se genera diferentes tipos de absorciones según su grado de hibridación tal como se muestra a continuación (McMurry, 2018):

C sp³ _____H (-CH, alcanos): 2800-3000 cm⁻¹.

C sp² _____H (=CH, alquenos): 3000-3300 cm⁻¹.

C sp _____H (=CH, aromático): 3030 cm⁻¹.

C sp _____H (=CH), alquinos): 3300 cm⁻¹.

En alcanos, los enlace C-H, la vibración de estiramientos a 3000 cm⁻¹ tenemos:

- En alcanos la absorción ocurre a la derecha de 3000 cm⁻¹.
- Si un compuesto tiene hidrógenos vinílicos, aromáticos o acetilénicos, la absorción del -CH es la izquierda de 3000 cm⁻¹.
- CH₂ los metilenos tienen una absorción característica de 1450-1485 cm⁻¹ (flexión).
La banda de 720 cm⁻¹ se presenta cuando hay más de 4 metilenos juntos.
- CH₃ los metilos tienen una absorción característica de 1375-1380 cm⁻¹.

En alquenos tenemos enlaces:

- =C-H vibración de estiramiento ocurre a 3000-3300 cm⁻¹.
- C=C vibraciones de estiramiento, en la región de 1600-1675 cm⁻¹, a menudo son bandas débiles.
- =C-H vibraciones de flexión fuera del plano en la región de 1000-650 cm⁻¹.

Los enlaces de grupos alquinos se pueden identificar en:

- $\equiv\text{C-H}$ vibración de estiramiento ocurre a 3300 cm^{-1} .
- $\text{C}\equiv\text{C}$ vibración de estiramiento cerca de 2150 cm^{-1} .

Los compuestos aromáticos como el benceno se caracterizan por generar absorciones de estiramiento débil del enlace C-H en la longitud de 3030 cm^{-1} , justo a la izquierda de una típica saturada banda C-H. Además, tiene una serie de absorciones débiles en el intervalo de 1660 y 2000 cm^{-1} , y presenta una segunda serie de absorciones en las longitudes comprendidas entre 1450 y 1600 cm^{-1} , siendo estas últimas bandas de absorción causadas por los movimientos moleculares complejos del anillo entero (McMurry, 2018). Los compuestos Aromáticos se pueden identificar en:

- =C-H la absorción por estiramiento es a la izquierda de 3000 cm^{-1} .
- C-H flexión fuera del plano en la región de $900\text{-}690\text{ cm}^{-1}$, este tipo de absorción permite determinar el tipo de sustitución en el anillo.
- $\text{C}=\text{C}$ existen absorciones que ocurren en pares a 1600 cm^{-1} y 1450 cm^{-1} y son características del anillo aromático.

En alcoholes los grupos funcionales se pueden identificar en:

- O-H vibraciones de estiramiento. Para un alcohol asociado la característica es una banda intensa y ancha en la región de $3000\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$. Un alcohol monomérico da una banda aguda en $3610\text{-}3640\text{ cm}^{-1}$.
- C-O vibración de estiramiento localizado en $100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$.
- C-OH flexión en el plano en $1200\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$.
- C-OH flexión fuera del plano en $250\text{-}650\text{ cm}^{-1}$.

2.8.2.4. *Caracterización de hidrocarburos con FTIR.*

La técnica de FTIR es muy importante en la caracterización de hidrocarburos, ya que permite determinar el tipo de componentes presentes en el petróleo o fracción de este (parafinas, naftenos, aromáticos, isómeros, oxigenados, etc.) mediante la vibración presentes en las moléculas (Pichardo Rubio, 2011).

Los hidrocarburos pueden agruparse en dos familias principales que son: los alifáticos y aromáticos. En la familia de los alifáticos se agrupan los alcanos sencillos, los alquenos y los ciclo-alcanos. Mientas que dentro de la familia de los aromáticos se agrupan las moléculas que presentan anillos aromáticos que su vez se pueden clasificar en compuestos mono-sustituidos, di-sustituidos y poli-sustituidos (Pichardo Rubio, 2011).

Algunos compuestos identificados por (Espinoza & Cabrera, 2014; Miandad et al., 2017) y (Mancheno et al., 2016) en procesos de pirólisis utilizando plásticos han sido principalmente compuestos aromáticos poli-cíclicos como el, estireno, naftaleno, tolueno, etilbenceno, benceno, benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno, indeno (1, 2, 3-c, d) pireno, benzo (ghi) perileno, y algunos otros compuestos alifáticos.

Si se destila un hidrocarburo producto de un proceso de pirólisis o gasificación utilizando plásticos, se puede obtener algunos productos de interés en la industria automovilística, como: diésel, queroseno, gasolina. Los porcentajes de cada compuesto variará dependiendo de la cantidad y tipo de plástico utilizado en el proceso (Ferrero, 2013).

CAPÍTULO 3

3. Materiales y Métodos

3.1. Obtención y tratamientos de botellas PET

Las botellas fueron obtenidas en los depósitos de envases PET que se disponían en la Universidad Politécnica Salesiana. El tipo de botellas selectas para los procesos de pirólisis y gasificación fueron las botellas que poseen poca densidad (botellas de agua marca Dasani), con el fin de obtener una mejor ruptura y separación de las molecular de las botellas PET.

Posterior a la recolección, se realizaron tratamientos de limpieza como el des-etiquetado (Fotografía 1), lavado (Fotografía 2) y secado.



Fotografía 1. Des-etiquetado de botellas PET.

Fuente: Autor.



Fotografía 2. Lavado de las botellas PET.

Fuente: Autor.

Para proceder a realizar los ensayos necesarios, fue necesario que las botellas presenten dimensiones pequeñas para la cual fueron cortadas en dimensiones de 5x5 cm (Fotografía 3) y posteriormente reducirles mediante un molino modelo So. Hackensack, NJ 07606 de la marca C.W. Brabender Instruments, Inc. y finalmente tener partículas muy finas de PET (Fotografía 4).



Fotografía 3. Botellas PET picadas.

Fuente: Autor.



Fotografía 4. Botellas PET molidas.

Fuente. Autor.

3.2. Descripción del reactor de pirólisis

El reactor utilizado para el desarrollo del proceso de pirólisis fue un reactor tipo cilindro, construido de acero de 2 mm de espesor, con 0.15 m de diámetro y 0.20 m de alto, llegando a tener un volumen de 0.003534 m^3 (3.53 lt). El reactor fue acoplado con una tubería de acero galvanizado de 1/2 pulgada, con una longitud aproximada de 1 m y adecuada con una llave de paso que permitió la recolección de los gases. Al final de la tubería, se elaboró el sistema de condensación de los gases, cuyo principio se lograba con agua solida (hielo) con la finalidad de no ocupar ni desperdiciar demasiada cantidad de recurso hídrico como los condensadores convencionales. En un costado del reactor, se colocó de un termómetro industrial con capacidad de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (Anexo1).

Este reactor se presenta en la Fotografía 5 y para una mejor descripción se modeló el reactor en AutoCAD (Ilustración 1), quedando de la siguiente manera:



Fotografía 5. Reactor pirolítico artesanal.

Fuente: Autor.

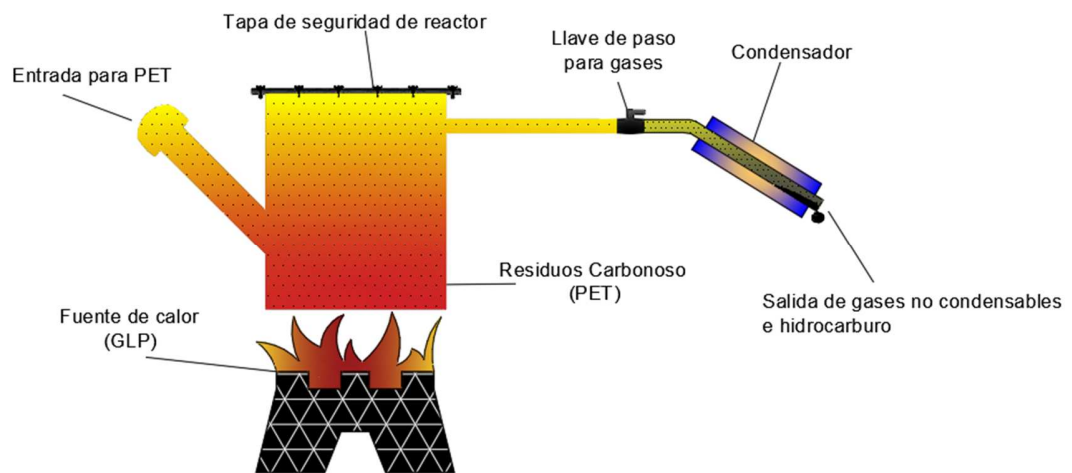


Ilustración 1. Diseño de reactor para el proceso de pirólisis.

Fuente: Autor.

Es necesario recalcar que el reactor ocupado para este método fue construido de manera artesanal. Para lograr la temperatura deseada se utilizó gas doméstico como fuente de calor

y para constatar su temperatura se utilizó un termómetro industrial. Esto se realizó debido a que el equipo de pirólisis que se disponía en la universidad tuvo inconvenientes en su funcionamiento por lo cual no fue útil para el desarrollo de este método.

3.3. Descripción del equipo de gasificador

El reactor de gasificación es el mismo utilizado para el equipo de pirólisis pues la única diferencia en los dos procesos es la temperatura y la presencia de oxígeno para generar una combustión incompleta a una temperatura mayor a 500 °C. El agente gasificante y la alimentación de PET, se realiza por la entrada adicional que se puede observar específicamente en la Ilustración 2:

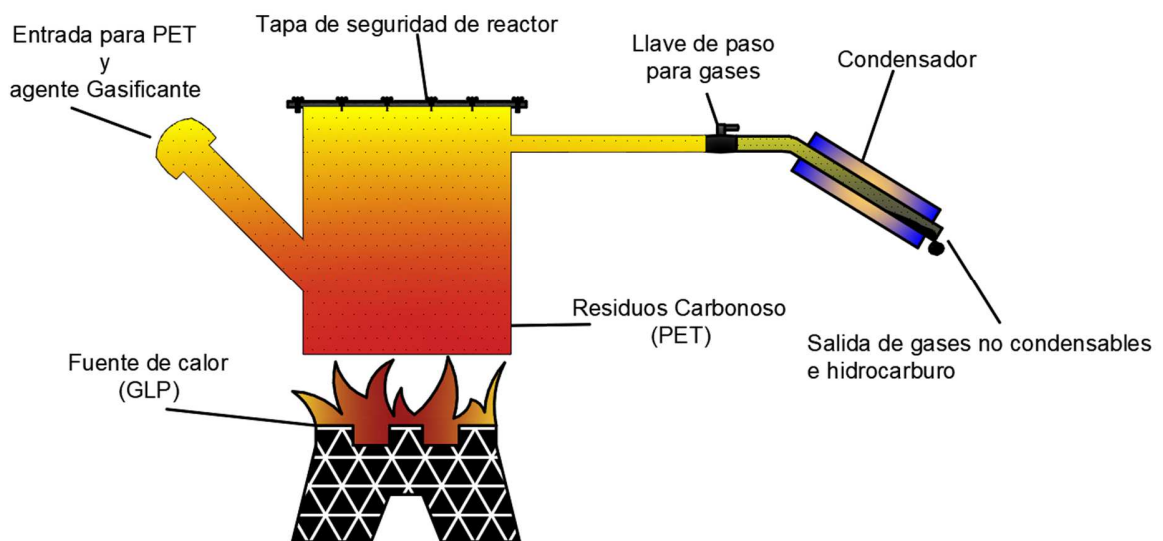


Ilustración 2. Diseño de reactor para proceso de gasificación.

Fuente: Autor.

En cuanto al agente gasificante se utilizó agua como fuente de oxígeno para realizar la combustión incompleta. Teniendo en cuenta las indicaciones de (Borge & Agudelo, 2010) se utilizó 1 ml de agua (agente gasificante) por cada 15 gramos de PET, con el fin de que las

concentraciones de oxígeno en el reactor sean mínimas y evitar que el poder calorífico del gas sea baja.

Para referenciar la temperatura sea superior a 500 °C, se intuyó visualmente cuando el reactor tomó un color rojo vivo (Anexo 2) como consecuencia a la alta temperatura. No se empleó el termómetro, pues no está diseñado para resistir las altas temperaturas.

3.4. Ensayos Físico-Químicas

Las pruebas fisicoquímicas realizadas en el hidrocarburo obtenido en los procesos tanto de gasificación como pirólisis son las siguientes (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017; Espinoza & Cabrera, 2014; INEN, 2015):

- Color y Olor
- Densidad
- Grados API
- Viscosidad
- Punto de inflamación (Flash Point)
- Punto de congelación
- Calor específico

3.4.1. Rendimiento

El rendimiento de los procesos, es la cantidad obtenida de hidrocarburo expresada en porcentaje en relación a los 15 g de PET utilizado por cada prueba, para lo cual se utilizó la Ecuación 1.

$$R = \frac{\text{Peso de Hidrocarburo} * 100 \%}{\text{Peso de PET utilizado}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Posterior a haber obtenido los rendimientos de cada prueba, se calculó la media de cada proceso y se procedió a realizar un análisis estadístico t-student.

La prueba t-student se utiliza para contrastar hipótesis sobre medias en poblaciones con distribución normal y determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos poblaciones independientes (García & González S, 2010). En este caso se realizó una comparación entre las medias del rendimiento entre los dos procesos.

La prueba t-student se realizó con la Herramienta de análisis de datos del programa Excel, para la cual se tuvo que disponer valores de los siguientes parámetros:

- Porcentajes del rendimiento de cada prueba realizada en cada uno de los procesos.
- Media del rendimiento de cada proceso.
- Se planteó una hipótesis nula (H_0) y una alternativa (H_a), considerando la variación de la normal de cada proceso.
- Se determinó el grado confianza y significancia (α). – el grado de confianza es el porcentaje de confianza de nuestra hipótesis (H_0), y el grado de significancia (α) es el grado de rechazo de la hipótesis H_0 . Normalmente se trabaja con un grado de confianza del 95% y una significancia del 5%, es decir $\alpha = 0.005$ (Tojes Pacheco, 2015).

Teniendo en cuenta todos estos aspectos se procedió a realizar la prueba t-student en la herramienta de análisis de datos del programa Excel. Posteriormente esta herramienta, lanzó los datos correspondientes, que luego se analizaron aprobando o rechazando las hipótesis planteadas, de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Rechazo H_0 si $P \leq \alpha$

- Acepto H_0 si $P > \alpha$

3.4.2. Color y olor

El color de los hidrocarburos está determinado por sus componentes y de su estructura molecular. Normalmente los hidrocarburos puros son incoloros, y van tomando alguna tonalidad cuando ocurren proceso de oxidación en aquellos hidrocarburos no saturados.

Estas pruebas no están estandarizadas ni normalizadas por lo que, para poder referenciales se basará en la percepción de un observador, es decir se identificarán mediante el sentido de olfato y vista (Espinoza & Cabrera, 2014).

Procedimiento

Para determinar el color se dejará caer una gota sobre un papel color blanco y realizar dicha comparación. Para el olor se considerará mediante la percepción del olfato y determinar si tiene alguna semejanza a alguna sustancia conocida.

3.4.3. Densidad

Para los análisis de la densidad se basó en la norma (ASTM, 2017) y la Venezolana COVENIN 2052-93 “Productos derivados del Petróleo. Determinación de la densidad relativa por medio del picnómetro Bingham”.

Procedimiento

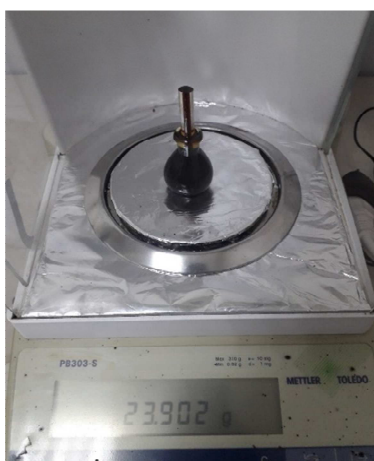
Utilizando un picnómetro de 10 ml, se calculó el peso del picnómetro en una balanza analítica con 0.1 g de sensibilidad (Fotografía 6), el cual se trató con una solución sulfocrómica para eliminar sus impurezas y evitar errores en los cálculos.



Fotografía 6. Peso de Picnometro vacio.

Fuente: Autor.

Conociendo estos datos, se realizó el análisis de la densidad del hidrocarburo. Se vertió la muestra en el picnómetro hasta el tope y colocar su tapón de tuvo capilar (Fotografía 7), el hidrocarburo debe estar a una temperatura de 30 °C, que es la temperatura que se trabajó en todos los análisis.



Fotografía 7. Peso de hidrocarburo a 30°C.

Fuente: Autor.

Para tener un mejor resultado, se realizó 3 pruebas y se obtuvo una normal, cuyo valor es el que se utilizó para realizar los cálculos.

Cálculos

La fórmula para determinar la densidad es la siguiente (COVENIN 2052, 1993):

$$dm = \frac{Pm * dw}{Pw} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

dm : Densidad de la muestra a 30°C (g/cm³).

dw : Densidad del agua a 30 °C (g/cm³).

Pm : Peso de la muestra contenida en el picnómetro a 30 °C (g).

Pw : Peso del agua contenida en el picnómetro a 30°C (g).

El valor de densidad del agua a 30 °C se obtiene de la tabla del anexo 4. Esta tabla la dispone la norma COVENIN 2052-93, donde expresa la densidad del agua a diferentes temperaturas, en este caso se debe conocer la densidad a 30 °C.

3.4.4. Grados API

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2319: 2001 “Productos derivados del petróleo, Determinación de la densidad API” indica que la densidad API, es una escala arbitraria relacionada con la densidad relativa del petróleo y determinada a 15,6/15,6 °C (60/60 °F), definida por la ecuación siguiente (Espinoza & Cabrera, 2014; INEN, 2001):

$$\bullet API = \frac{141.5}{GE(15^{\circ}C)} - 131.5 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\bullet API$: Grados API.

$GE (15^{\circ}C)$: Gravedad específica o densidad relativa a 15 °C.

Procedimiento y cálculos

Como primer paso, se corrigió la temperatura de ensayo de 30 °C a la temperatura estandar de 15 °C mediante la siguiente ecuación (Espinoza & Cabrera, 2014):

$$D(15^{\circ}C) = D(t_e) + b * (t_e + 15^{\circ}C) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$D(t_e)$: Densidad de la muestra a temperatura de ensayo (30°C).

b : Factor de corrección.

t_e : Temperatura de ensayo (30 °C).

El factor (b) de corrección se obtiene del Anexo 5, cuyo valor se basa en la densidad de la muestra obtenida a 30 °C.

Posteriormente se calculó el valor de la densidad realtiva o también conocida como gravedad específica, mediante la siguiente ecuación:

$$GE = \frac{D(15^{\circ}C)}{D_w(15^{\circ}C)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$D(15^{\circ}C)$: Densidad de la muestra a 15 °C.

$D_w(15^{\circ}C)$: Densidad de agua a 15°C.

Posterior a haber calculado todas las variables necesarias, se procedió a calcular los °API utilizando la Ecuación 3. El valor encontrado se comparó con la Tabla 3, para poder determinar el tipo de crudo obtenido.

Tabla 3. Tipo de crudo según Grados API

Tipo de Crudo	Grados API
Crudos Extra-livianos	> 40
Crudos Liviano	$> 30 \geq 40$
Crudos Medios	$> 22 \geq 30$
Crudos Pesados	$> 10 \geq 22$
Crudos Extra-pesados	≤ 10

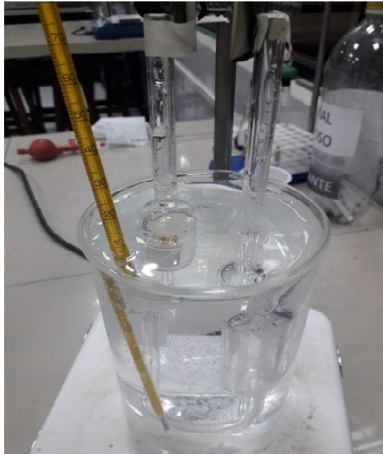
Fuente: (Espinoza & Cabrera, 2014)

3.4.5. Viscosidad

El cálculo de la viscosidad de los hidrocarburos obtenidos entre los dos procesos, se basó en la NTE INEN 810:1986 “Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos”.

El método consistió en medir el tiempo que le tomaba al hidrocarburo en fluir por acción de la gravedad, por medio del tubo capilar del viscosímetro a una temperatura constante controlada de 30 °C.

La constante de calibración del viscosímetro se refiere al tiempo que tomo el agua en fluir en el viscosímetro de ostwald (Fotografía 8).



Fotografía 8. Determinación de la constante de calibración del viscosímetro.

Fuente: Autor.

Procedimiento

Se calibró el viscosímetro lavándolo con una solución sulfocrómica para eliminar compuestos no deseados que pueda causar alteración en los resultados. Posteriormente se realizó un primer ensayo con agua destilada para poder determinar la constante de calibración del viscosímetro.

Se sumergió el viscosímetro en un vaso de precipitación con agua que esté a la temperatura de ensayo (30 °C). El agua se introdujo por un tubo de cualquier lado del viscosímetro. El agua se desplazó al brazo capilar superior hasta la línea que indica el nivel de sustancia que se debe disponer. Para poder mantener el agua en el brazo se utilizó una pera de succión, la misma que servirá para llevar la muestra hasta su nivel requerido creando un vacío e impedir que el líquido fluya por el tubo capilar.

Teniendo el líquido listo en el viscosímetro, se retiró la pera y desde esta instancia se tomó el tiempo hasta que el líquido fluya y llegue al límite inferior del brazo. Se repite el mismo procedimiento tanto con el agua destilada como con el hidrocarburo al menos unas tres veces para lograr una mayor precisión en los resultados.

Cálculos

Para determinar la viscosidad de la muestra, se utilizó las ecuaciones siguientes con las cuales, se debe obtener las variables necesarias (Espinoza & Cabrera, 2014).

$$C = \frac{V_{cw}}{tw} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

C: Constante de calibración del viscosímetro, cSt/s.¹

V_{cw}: Viscosidad cinemática del agua, cSt.

tw: Tiempo que tarda el agua en fluir en el viscosímetro, s.

Una vez obtenida la constante de calibración del viscosímetro, procedemos a buscar la viscosidad cinemática del agua utilizando la Ecuación 7:

$$V_{cw} = \frac{V_d}{d_w} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

V_{cw}: Viscosidad cinemática del agua, m²/s.

V_d: Viscosidad dinámica del agua, kg/m.s (Anexo 9).

d_w: Densidad del agua, kg/m³.

Finalmente se obtuvo la viscosidad cinemática de la muestra, utilizando la siguiente ecuación:

¹ 1mm² /s = 1 cSt, 1 cSt = 10⁻⁶ m² /s (INEN, 1986)
cSt: centistokes

$$V_{cm} = C * t_m \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

V_{cm} : Viscosidad cinemática de la muestra, cSt.

C: Constante de calibración cSt /s.

t_m : Tiempo que tarda la muestra en recorrer en el viscosímetro, s.

3.4.6. Punto de inflamación y combustión

Para realizar este análisis se utilizó la norma (NTE INEN, 2013), “Productos de petróleo. Determinación de los puntos de inflamación”, la cual brinda los procesos que se deben seguir para encontrar el punto de inflamación y combustión de un combustible proveniente del petróleo crudo.

Procedimiento

Se inició limpiando el vaso Cleveland con alcohol y agua destilada, con el fin de eliminar cualquier compuesto o sustancia que pudiera contener en su interior y que pueda causar reacciones con el compuesto utilizado o causar cualquier otro tipo de alteración. Posteriormente se colocó un volumen determinado al vaso (30 ml), considerando de que este superara la mitad del volumen del vaso. Posteriormente se calentó el vaso junto con la sustancia de ensayo hasta una temperatura de 56 °C aproximadamente y se dejó que disminuya su temperatura hasta los 28 °C.



Fotografía 9. Prueba para determinar el punto de inflamación en aparato Cleveland.

Fuente: Autor.

Nuevamente se calentó el vaso con la muestra, teniendo en cuenta que la velocidad de calentamiento esté entre unos $5,5 \pm 0,5$ °C por minuto (Fotografía 9). A partir de los 28 °C, se pasó una llama de fuego a la altura del vaso cada 2 °C que aumentaba la temperatura.

Cuando se observó una llamarada que duró alrededor de 1 segundo sobre la superficie de la muestra, se registró la temperatura como punto de inflamación.

Continuando con el ensayo, para poder determinar el punto de combustión, se dejó que la temperatura siga aumentando con la misma velocidad, hasta que se observó una llamarada en toda la superficie de la muestra y que durara al menos 5 segundos, registrando dicha temperatura como punto de combustión.

3.4.7. Punto de congelación

Para determinar el punto de congelación de los hidrocarburos obtenidos en los procesos de pirólisis y gasificación se basó en la norma (ASTM, 2015), "Método de prueba estándar para el punto de congelación de combustibles de aviación", la cual también es aplicable para los análisis de los productos obtenidos en nuestro estudio.

Procedimiento

Se colocó 15 ml de muestra del hidrocarburo de cada proceso en un matraz de 50 ml, se tapó con un corcho y se dejó reposar en el congelador por 48 horas, posterior a esto se colocó, los envases con las muestras sobre una fuente de calor (hornilla a baja temperatura, 50 °C) y un termómetro por el corcho para medir la temperatura hasta que los últimos cristales de hielo desaparezcan.

3.4.8. Calor específico

El proceso para determinar el calor específico, parte de la Ecuación inicial que se utiliza para determinar el poder calorífico. La ecuación es:

$$Q = m * Ce * \Delta t \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

m: Masa (g).

Ce: Calor específico (cal/g.°C o J/kg.K).

Δt : temperatura de equilibrio (°C).

Procedimiento

Se colocó una cierta cantidad de agua (m_w) en el calorímetro, teniendo en cuenta su temperatura ambiente. Posteriormente, se calentó una cantidad de muestra (m_m) considerando que la temperatura sea menor a 100 °C (Fotografía 10). Las cantidades tanto del agua, como de la muestra pueden variar, según sea el equilibrio del envase que contiene la muestra dentro del calorímetro con el fin de evitar derrames. En este caso, se utilizó 100 g de agua y 29 g de muestra de proceso de pirólisis y 30 g de producto de proceso de gasificación.



Fotografía 10. Prueba de calorimetría.

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta los pesos y las temperaturas de cada sustancia, el agua se colocó en el calorímetro y la muestra se vertió en un vaso de precipitación de 50 ml, con el fin de que esta pueda entrar con facilidad en el calorímetro.

Se colocó tanto el agua como la muestra en el calorímetro y mediante un termómetro incrustado en la tapa del calorímetro se esperó hasta que la temperatura interna del calorímetro permanezca constante (Fotografía 11).



Fotografía 11. Determinación de la temperatura de equilibrio en calorímetro.

Fuente: Autor.

Cálculos

Se inició igualando de ecuaciones (Ecuación 9) del poder calorífico, tanto del agua como de la muestra (Academia-Internet, 2014):

$$Q_w = Q_m$$

$$m_w * C_{ew} * \Delta t = m_m * C_{em} * \Delta t$$

Conocidas las variables, tanto del agua como de la muestra, se despejó la variable desconocida (C_{em}), en este caso, se deseaba conocer el valor del calor específico de la muestra, quedándonos la siguiente ecuación:

$$C_{em} = \frac{m_w * C_{ew} * \Delta t}{m_m * \Delta t} \quad (\text{Ecuación 10})$$

3.5. Metodología de la Espectroscopia de infrarrojo

Para realizar el análisis del espectro de la sustancia obtenida, se utilizó el espectrómetro FTIR de la Universidad (Fotografía 12).



Fotografía 12. Espectrómetro FTIR modelo NICOLET i510 de la UPS.

Fuente: Autor.

Para obtener el espectro IR, se utilizó el sensor adecuado para sustancias en estado líquido. Previo a colocar la muestra, se limpió el panel de radiación del equipo y el sensor del espectrómetro con etanol al 15% o Alcohol isopropílico. Posteriormente se colocó una gota de la muestra del hidrocarburo en el sensor y se esperó que el equipo analice la muestra

y de un resultado. Cuando se genera la curva, se realizó una comparación con una o varias curvas estándar que dispone el equipo FTIR para comparar con el espectro de algún componente esperado. Al ser un compuesto nuevo, se procedió a analizarla mediante algunas especificaciones teóricas y también se basó en la Tabla del Anexo 8, para identificar los compuestos presentes en los hidrocarburos de cada proceso.

CAPÍTULO 4

4. Resultados y Discusión

4.1. Rendimiento

La cantidad total de hidrocarburo obtenidas en el proceso de pirólisis y gasificación se observan en las Fotografías 13 y 14 respectivamente.



Fotografía 13. Producto obtenido en proceso de pirólisis.

Fuente: Autor.



Fotografía 14. Producto obtenido en proceso de gasificación.

Fuente: Autor.

Utilizando la Ecuación 1, se encontró el rendimiento de cada prueba en cada proceso, cuyos valores se expresan en el Anexo 6 y Anexo 7 respectivamente, y en forma resumida, se presenta las medias del rendimiento de cada proceso en la Tabla 4.

Tabla 4. Rendimiento de los procesos de pirólisis y gasificación.

Proceso	Número de pruebas	Peso de PET utilizado	Peso de hidrocarburo	Media de Rendimiento
				$R = \frac{\text{Peso de Hidrocarburo} * 100 \%}{\text{Peso de PET utilizado}}$
Pirólisis	100	1500 g	104.40 g	6.96 %
Gasificación	25	375 g	73.79 g	19.68 %

Fuente: Autor.

Considerando las medias del rendimiento de cada proceso, se procedió a realizar el análisis estadístico t-student, iniciando con el planteamiento:

Hipótesis nula (H₀). – El rendimiento en el proceso de gasificación no es mayor al rendimiento del proceso de pirólisis.

Hipótesis alternativa (Ha). – El rendimiento en el proceso de gasificación es mayor al rendimiento del proceso de pirólisis.

Planteada la hipótesis y conociendo el valor de significancia (5% o 0.05), mediante la herramienta de análisis de datos, se procede a cargar los datos y posteriormente dejar correr la herramienta hasta que genere una tabla de valores (Tabla 5).

Tabla 5. Resultado de prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

	Variable 1	Variable 2
Media	6.9597	19.6773333
Varianza	0.443006531	0.89099259
Observaciones	100	25
Varianza agrupada	0.530418445	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	123	
Estadístico t	-78.09297866	
P(T<=t) una cola	5.8063E-107	
Valor crítico de t (una cola)	1.657336397	
P(T<=t) dos colas	1.1613E-106	
Valor crítico de t (dos colas)	1.979438685	

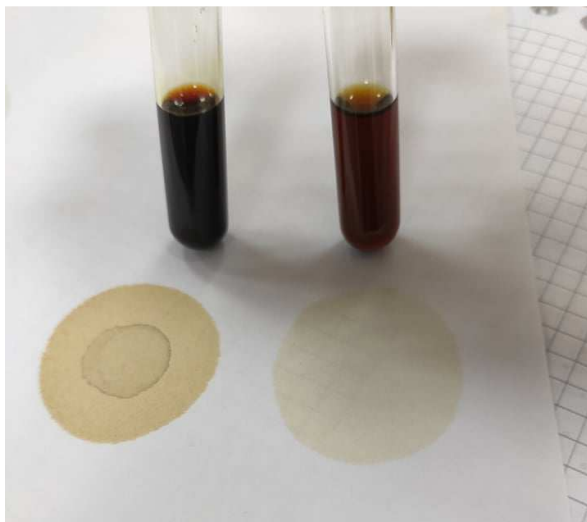
Fuente: Autor.

De los valores obtenidos en la Tabla 5 generada por la herramienta de análisis estadístico, el valor de interés para aprobar o rechazar la hipótesis nula es el valor P(T<=t) dos colas, cuyo valor fue de 1.1613E-106.

Considerando estos resultados obtuvimos que, el valor P (1.1613E-106) obtenida en el análisis t-student, es menor al valor de significancia α (0.05). Esto quiere decir que la hipótesis nula (Ho) planteada se rechaza, dándonos como consecuencia la aceptación de la hipótesis alternativa, que indica que el rendimiento del proceso de gasificación si fue mayor al rendimiento del proceso de pirólisis.

4.2. Color y Olor

El color obtenido tanto en el proceso de pirólisis como en gasificación se presentan a continuación en la Fotografía 15.



Fotografía 15. Prueba de color de los productos de gasificación y pirólisis.

Fuente: Autor.

Como se puede ver en la Fotografía 15, se muestran las tonalidades que presentó el hidrocarburo obtenido en el proceso de gasificación y pirólisis. El color de lado izquierdo de la Fotografía 15, corresponde al producto de gasificación y el de lado derecho al producto de pirólisis.

Como se puede observar, ambos tuvieron una tonalidad oscura, pero el del producto de gasificación fue más intensa, por lo que se intuyó que dicho color se formó debido a la combustión incompleta que se realizó en el proceso de gasificación.

En cuanto al olor, ambos tuvieron un aroma que se asemejaron al aroma de la gasolina, disolvente o un esmalte, siendo el producto de gasificación el que tuvo mayor intensidad, debido a que causó una irritación rápida de las fosas nasales en el momento de percibir su olor.

4.3. Resultados pirólisis

4.3.1. Densidad

Para determinar la densidad, se necesitó conocer algunas variables como se muestra en la Tabla 6, y poder utilizar la Ecuación 2 de la densidad.

Tabla 6. Variables para determinar la densidad de la muestra.

variable	valor
$dm=$	X
$dw=$	0.99567 g
$Pm=$	X
$Pw=$	11.861 g

Fuente: Autor.

El peso de la muestra (Pm) utilizada, es el promedio obtenido de tres pesos diferentes como se expresa en la Tabla 7, con el fin de obtener un dato más exacto.

Tabla 7. Pesos de la muestra de los diferentes ensayos.

Peso de la muestra (Pm)	
$Pm1:$	11.1377 g
$Pm2:$	11.1293 g
$Pm3:$	11.1163 g
$Promedio Pm=$	11.1278 g

Fuente: Autor.

Continuando con los cálculos, se determinó la densidad del hidrocarburo utilizando la Ecuación 2:

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

$$dm = \frac{11.1278 \text{ g} * 0.99567 \text{ g/ml}}{11.861 \text{ g}}$$

$$dm = 0.9351 \text{ g/ml}$$

$$dm = 935.1 \text{ kg/m}^3$$

4.3.2. Grados API

Se utilizó las Ecuaciones 4 y 5 para corregir la densidad $D(15^{\circ}\text{C})$ y la gravedad específica (GE) respectivamente:

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

$$D(15^{\circ}\text{C}) = 0.9341 \frac{\text{g}}{\text{ml}} + 0.000625 \text{g/ml} * (30^{\circ}\text{C} + 15^{\circ}\text{C})$$

$$D(15^{\circ}\text{C}) = 0.9622 \text{ g/ml}$$

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

$$GE = \frac{0.9944 \text{ g/ml}}{0.99913 \text{ g/ml}}$$

$$GE = 0.9631$$

Como siguiente paso, se calculó los $^{\circ}\text{API}$, utilizando la Ecuación 3:

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

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{0.9631} - 131,5$$

$$^{\circ}\text{API} = 15$$

4.3.3. Viscosidad

De acuerdo al procedimiento de la viscosidad, primero se determinó la viscosidad cinemática del agua a 30°C , para ello se utilizó la Ecuación 7.

$$V_{cw} = \frac{Vd}{dw}$$

La viscosidad dinámica del agua a 30 °C se encuentra en el Anexo 9, y dw en el Anexo

3. Entonces se obtuvo:

$$V_{cw} = \frac{0.000798 \frac{kg}{m \cdot s}}{995.67 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_{cw} = 0.0000008 \text{ m}^2/\text{s}$$

Posteriormente se determinó la constante de calibración del viscosímetro, para ello se utilizó la Ecuación 6.

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

Para determinar tw, se midió el tiempo de fluidez del agua destilada en el viscosímetro, los mismos que se expresan en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempos obtenidos en fluir el agua en el viscosímetro.

Tiempo de flujo del agua en el viscosímetro	
tw1=	335 s
tw2=	332 s
tw3=	328 s
Promedio tw=	332 s

Fuente: Autor.

$$C = \frac{0.0000008 \frac{m^2}{s}}{332 \text{ s}}$$

$$C = 2.4 * 10^{-5} \frac{m^2}{s \cdot s}$$

$$C = 0.00242 \text{ cSt/s}$$

Finalmente, utilizando la Ecuación 8, se obtuvo la viscosidad cinemática de la muestra del proceso de pirólisis, para la cual se tomó el tiempo t_m (Tabla 9) que tardó en fluir el hidrocarburo del proceso de pirólisis en el viscosímetro (Fotografía 16).



Fotografía 16. Prueba en viscosímetro de ostwald para calcular el tiempo de flujo del hidrocarburo.

Fuente: Autor.

Tabla 9. Tiempos obtenidos en fluir la muestra en el viscosímetro.

Tiempo que tarda la muestra en fluir en el viscosímetro	
$t_{m1} =$	534 s
$t_{m2} =$	503 s
$t_{m3} =$	511 s
Promedio $t_m =$	516 s

Fuente: Autor.

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

$$V_{cm} = 0.00242 \frac{\text{cSt}}{\text{s}} * 516 \text{ s}$$

$$V_{cm} = 1.2 \text{ cSt}$$

4.3.4. Calor específico

Utilizando la Ecuación 10, y conociendo sus variables expresadas en la Tabla 10, se calculó el calor específico de la muestra.

Tabla 10. Variables para determinar el calor específico de la muestra.

variable	valor
$m_w =$	100 g
$T_w =$	23 °C
$C_{e w} =$	1 cal/g.°C
$\Delta t =$	X
$m_m =$	29 g
$T_m =$	90 °C
$C_{e m} =$	X

Fuente: Autor.

La variable Δt (temperatura de equilibrio) expresada en la Tabla 11, es la temperatura de equilibrio alcanzada en el calorímetro con el producto de pirólisis.

Tabla 11. Temperatura de equilibrio obtenida en los ensayos de la muestra de pirólisis.

Temperatura de equilibrio	
$\Delta t_1 =$	35 °C
$\Delta t_2 =$	33 °C
$\Delta t_3 =$	33 °C
promedio $\Delta t =$	34 °C

Fuente: Autor.

$$C_{em} = \frac{m_w * C_{ew} * \Delta t}{m_m * \Delta t}$$

$$C_{em} = \frac{100 \text{ g} * 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C} * (34^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C})}{30 \text{ g} * (90^\circ\text{C} - 34^\circ\text{C})}$$

$$C_{em} = \frac{1066.67 \text{ cal}}{1690.00 \text{ g.}^\circ\text{C}}$$

$$C_{em} = 0.6644 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_{em} = 2781.71 \text{ J/kg.K}$$

4.3.5. Punto de inflamación y punto de combustión

El punto de inflamación fue a los 44 °C, que es cuando se observó la llamarada en el vaso Cleveland (Fotografía 17). Posteriormente se realizó una nueva prueba con una temperatura más alta y a los 48 °C se observó una llamarada en toda la superficie de muestra en el vaso, el mismo que fue considerado como el punto de combustión.



Fotografía 17. Determinación del punto de inflamación del hidrocarburo de pirólisis.

Fuente: autor.

4.3.6. Punto de congelación

El punto de congelación donde los cristales sólidos desaparecieron en su totalidad en el Erlenmeyer de 50 ml, fue en los -3 °C, después de ser sometido a una fuente de calor en el matraz que se dejó reposar por 48 horas en el congelador.



Fotografía 18. Determinación del punto de congelación del hidrocarburo de pirólisis.

Fuente: autor.

4.3.7. Espectro de infrarrojo

La curva o espectro que se generó en el FTIR, con la muestra del producto de pirólisis es la siguiente:

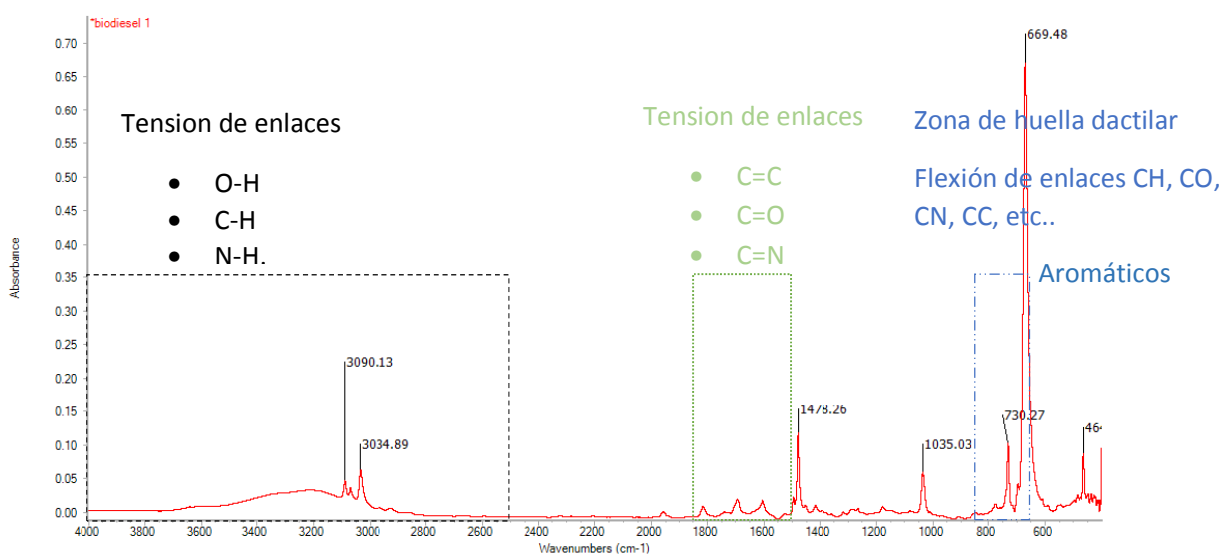


Ilustración 3. Espectro IR del hidrocarburo obtenido en el proceso de pirólisis.

Fuente: Autor.

De acuerdo con el Anexo 8 y otras fuentes bibliográficas, los compuestos identificados en el espectro de la Ilustración 3 fueron:

- Según la banda que se observó en 3034.89 cm^{-1} y basándonos en la teoría de (McMurry, 2018), el cual menciona que, la absorción de la banda por estiramiento del enlace C-H, cuando la banda está en 3030 cm^{-1} , tenemos la presencia de un compuesto aromático con hibridación del átomo de C sp^2 .
- De igual forma, la banda formada en 3090.13 cm^{-1} del espectro, basándonos en la tabla del Anexo 3, donde menciona que en el rango de 3150 y 3050 cm^{-1} , se tiene la presencia de un enlace de benceno sustituido.
- De acuerdo a las especificaciones de (Mondragón Cortez, 2015), indica que, en la región señalada de azul ($850-600\text{ cm}^{-1}$), donde se forma la banda 730.27 cm^{-1} , y de acuerdo con la tabla del Anexo 8, tenemos que es un compuesto de enlace C-H de tipo aromático, específicamente enlaces de tipo benceno monosustituido.

4.4. Resultados Gasificación

4.4.1. Densidad

Para determinar la densidad específica de la muestra de gasificación, se necesitó conocer algunas variables como se observa en la Tabla 12, y poder utilizar la Ecuación 2 de la densidad.

Tabla 12. Variables para determinar la densidad de la muestra.

variable	valor
$dm=$	X
$dw=$	0.99567 g/ml
$Pm=$	X
$Pw=$	11.861 g

Fuente: Autor.

El peso de la muestra (P_m) utilizada, es el peso promedio obtenido de tres pesos realizados con la muestra de gasificación como se expresa en la Tabla 13, con la finalidad de obtener un dato más exacto y preciso.

Tabla 13. Pesos obtenidos de la muestra de gasificación con el picnómetro de 10 ml.

Peso de la muestra (P_m)	
$P_{m1} =$	10.9070 g
$P_{m2} =$	10.9062 g
$P_{m3} =$	10.8752 g
Promedio $P_m =$	10.8961 g

Fuente: Autor.

Como consiguiente paso, se calculó la densidad de la muestra utilizando la Ecuación 2:

$$dm = \frac{P_m * dw}{P_w}$$

$$dm = \frac{10.8961 \text{ g} * 0.99567 \text{ g/ml}}{11.861 \text{ g}}$$

$$dm = 0.9147 \text{ g/ml}$$

$$dm = 914.7 \text{ kg/m}^3$$

4.4.2. Grados API

Se utilizó las Ecuaciones 4 y 5 para corregir la densidad $D(15^\circ\text{C})$ y la gravedad específica (GE) respectivamente, teniendo en cuenta las variables expresadas en la Tabla 14.

Tabla 14. Variables consideradas para determinar los grados API.

Variable	Valor
$GE (15^\circ\text{C}) =$	X
$D (15^\circ\text{C}) =$	X
$D (t_e) =$	0.9147 g/ml
$b =$	0,000625
$t_e =$	30 °C
$D_w (15^\circ\text{C}) =$	0.99913 g/ml

Fuente: Autor.

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

$$D(15^{\circ}C) = 0.9147 \frac{g}{ml} + 0.000625 \frac{g}{ml} * (30^{\circ} + 15^{\circ}C)$$

$$D(15^{\circ}C) = 0.9428 \text{ g/ml}$$

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

$$GE = \frac{0.9428 \text{ g/ml}}{0.99913 \text{ g/ml}}$$

$$GE = 0.9436$$

Como siguiente paso, se calculó los °API, utilizando la Ecuación 3:

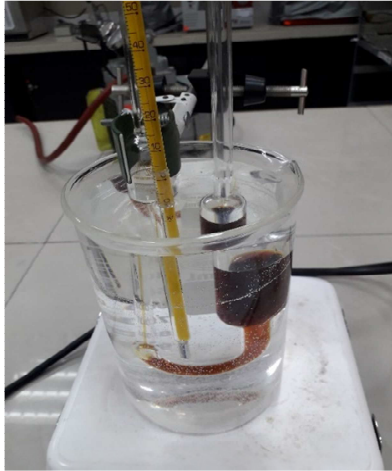
$$\bullet API = \frac{141,5}{GE(15^{\circ}C)} - 131,5$$

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{0.9436} - 131,5$$

$$^{\circ}API = 18$$

4.4.3. Viscosidad

Teniendo en cuenta que la constante de calibración del viscosímetro de ostwald (C=0.00242 cSt/s) se obtuvo con anterioridad en la sección 4.2.3 (viscosidad del proceso de pirólisis) y tomando el tiempo de flujo del hidrocarburo de gasificación en el viscosímetro (Fotografía 19) que se expresa en la Tabla 15, se determinó la viscosidad cinemática de la muestra utilizando la Ecuación 8.



Fotografía 19. Prueba en viscosímetro de ostwald para calcular el tiempo de flujo del hidrocarburo de gasificación.

Fuente: Autor.

Tabla 15. Tiempos de flujo de la muestra de gasificación en el viscosímetro.

Tiempo de flujo de la muestra en el viscosímetro	
tm1=	393 s
tm2=	399 s
tm3=	395 s
Promedio tm=	395,7 s

Fuente: autor.

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

$$V_{cm} = 0.00242 \frac{\text{cSt}}{\text{s}} * 395.7 \text{ s}$$

$$V_{cm} = 1 \text{ cSt}$$

4.4.4. Calor específico

Utilizando la Ecuación 10, y conociendo las variables expresadas en la Tabla 16, se calculó el calor específico del hidrocarburo de gasificación.

Tabla 16. Variables para determinar el calor específico de la muestra.

variable	valor
$m_w =$	100 g
$T_w =$	23 °C
$C_{e w} =$	1 cal/g.°C
$\Delta t =$	35 °C
$m_m =$	30 g
$T_m =$	90 °C
$C_{e m} =$	X

La variable Δt (temperatura de equilibrio)

expresada en la Tabla 17, es la temperatura de equilibrio alcanzada en el calorímetro con el producto de gasificación.

Tabla 17. Temperatura de equilibrio obtenida en los ensayos de la muestra.

Temperatura de equilibrio	
$\Delta t_1 =$	36 °C
$\Delta t_2 =$	35 °C
$\Delta t_3 =$	34 °C
promedio $\Delta t =$	35 °C

Fuente: autor.

$$C_{em} = \frac{m_w * C_{ew} * \Delta t}{m_m * \Delta t}$$

$$C_{em} = \frac{100 \text{ g} * 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C} * (35^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C})}{30 \text{ g} * (90^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C})}$$

$$C_{em} = \frac{1200.00 \text{ cal}}{1650.00 \text{ g.}^\circ\text{C}}$$

$$C_{em} = 0.7273 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_{em} = 3045.06 \text{ J/kg.K}$$

4.4.5. Punto de inflamación y punto de combustión

El punto de inflamación del hidrocarburo de gasificación fue a los a los 42 °C, que es cuando se observó la llamarada en el vaso Cleveland (Fotografía 20). En cuanto al punto de combustión, cuando se observó una llamarada en toda la superficie de la muestra en el vaso, fue a los 48 °C.



Fotografía 20. Determinación de punto de inflamación del hidrocarburo de gasificación.

Fuente: autor.

4.4.6. Punto de congelación

El punto de congelación del hidrocarburo de gasificación, donde los últimos cristales sólidos desaparecieron fue a los $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Fotografía 21. Determinación del punto de congelación del hidrocarburo de gasificación.

Fuente: autor.

4.4.7. Espectro de infrarrojo

El espectro que se obtuvo en la espectroscopia FTIR, con el producto de gasificación es la siguiente:

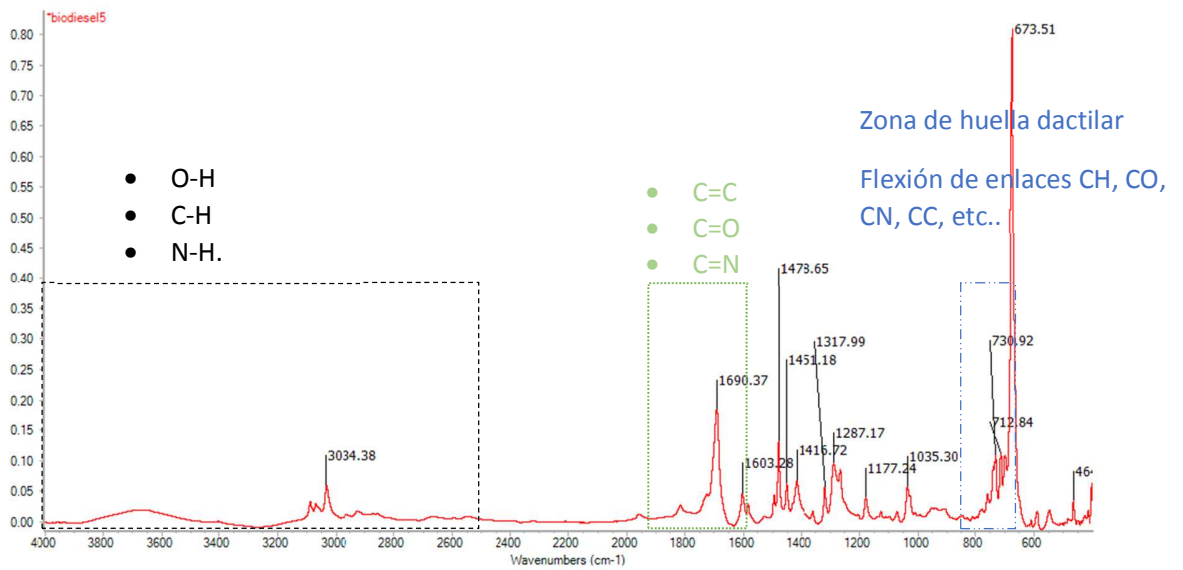


Ilustración 4. Espectro IR del hidrocarburo obtenido en el proceso de Gasificación.

Fuente: Autor.

A diferencia del espectro del proceso de pirólisis, en el espectro IR del proceso de gasificación se observó varias bandas en la sección de la huella digital. Basándonos en el Anexo 8 y algunas bibliografías se sostuvo que:

- Al igual que el espectro de proceso de pirólisis en la banda comprendida entre 2500 y 4000 cm^{-1} se observó una similitud en los picos teniendo algunas variaciones. Según (McMurry, 2018), la banda que se genera en la longitud de 3034.38 cm^{-1} , tenemos la presencia de un compuesto aromático con hibridación del átomo de C sp^2 y de igual manera se presenció un enlace de benceno sustituido.
- En la rango de 650 y 850 cm^{-1} indicada por (McMurry, 2018), nos indica que, la banda generada en la longitud de 673.51 cm^{-1} , son grupos de enlaces C-H de vinilo, específicamente un enlace de alqueno cis-disustituido.

- De igual manera, basándonos en tabla del Anexo 3, se sostuvo que, la banda generada en la longitud de 730.9 cm^{-1} es un enlace C-H de tipo aromático, específicamente enlaces de tipo benceno monosustituido.

4.5. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, considerando los bajos rendimientos obtenidos en nuestros procesos, se pudo sostener que, la escasa información sobre estudios relacionados con procesos de pirólisis y gasificación utilizando botellas PET, se debe a la poca cantidad de producto líquido generado; respaldando así, a lo mencionado por

(Sharuddin et al., 2018), que indica que, el PET y el PVC son dos plásticos que producen un rendimiento muy bajo de aceite en comparación con otros tipo de plásticos. En nuestros análisis se obtuvo un rendimiento de producto líquido de 6.96 % en pirólisis y 19.68 % en gasificación, estos valores fueron superiores al 2.13 % obtenido por (Espinoza & Cabrera, 2014), mientras que (Fakhrhoseini & Dastanian, 2013) afirma haber obtenido un rendimiento de 39.89%. El rendimiento utilizando otros residuos plásticos como el PS, PP y PEAD realizados por (Egas et al., 2018; Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Rejas et al., 2015) muestran rendimientos mayores a 70%. Hay que considerando de que estos resultados fueron obtenidos al trabajar con variables diferentes como; uso de catalizador, temperatura, tiempo de residencia, tipo de reactor entre otros.

Los olores captados en ambos productos fueron un poco irritantes por lo que se pudo percibir aromas que se asemejaban al diésel, gasolina y disolvente. El olor del producto de gasificación fue más intenso e irritante, concordando así con (Vijayakumar & Sebastian, 2018) quien menciona que la sensación de irritación se debe a la presencia de altas concentraciones de ácido benzoico. El olor captado en los productos de nuestros procesos también concuerda con lo identificado por (Espinoza & Cabrera, 2014) y (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017), quienes afirman que el producto líquido obtenido en sus ensayos utilizando PEAD, PEBD Y PS contenían ciertas concentraciones de gasolina, diésel y otros componentes derivados del petróleo.

El color del producto líquido de pirólisis utilizando PET fue de color amarillo, similar al producto líquido obtenido en los estudios de (Espinoza & Cabrera, 2014), en donde muestran una pequeña cantidad del producto obtenido (Anexo 12). Es necesario recalcar que, en mencionado estudio, sus autoras mencionan no haber obtenido resultados suficientes para

realizar los posteriores análisis fisicoquímicos. (Rejas et al., 2015) afirma que en sus estudios utilizando PET no obtuvieron producto líquido, pero si observaron la formación de una masa con aspecto grasosa de color plata. El color en el proceso de gasificación fue más oscuro por lo que se intuyó que dicha coloración se produjo por la combustión incompleta del proceso.

La densidad en los hidrocarburos de pirólisis y gasificación fueron de 0.934 g/ml y 0.914 g/ml respectivamente, teniendo una diferencia de 0.02 g/ml. Las densidades de los productos de los dos procesos son superiores a las densidades de los productos obtenidos por (Espinoza & Cabrera, 2014) cuyo valor es 0.889 g/ml utilizando PEAD. De igual manera, la densidad del producto obtenido por (Arce Lucin & Suarez Moreno, 2017) utilizando PEBD y de (Crespo Palma, 2013) utilizando PE es de 0.88 g/ml y 0.759 g/ml respectivamente. Teniendo en cuenta estos datos, se puede mencionar que; tanto nuestros hidrocarburos obtenidos de PET, como los de otros tipos de plásticos presentan densidades altas, a diferencia del PE, cuya densidad es baja. Mediante esta comparación se puede mencionar que, nuestros productos poseen bajas concentraciones de compuestos aromáticos; pues (Cortés Llerena, 2017) señala que la densidad es un indicador del poder calorífico y de las concentración de componentes aromáticos (mientras menos denso sea un hidrocarburo, mayor será su poder calorífico y sus concentraciones de compuestos aromáticos).

Relacionando el parámetro de color con el parámetro de °API, basándonos en la Tabla 3 indicada por (Espinoza & Cabrera, 2014) y (Cortés Llerena, 2017) se pudo sostener que, los productos obtenidos (°API=15 en pirólisis y °API=18 en gasificación) fueron hidrocarburos pesados y de baja calidad. (Cortés Llerena, 2017) también sostiene que los productos con colores de tonalidades oscuros como los obtenidos en nuestro proceso de

pirólisis y gasificación (Fotografía 16), poseen una baja concentración de hidrocarburos aromáticos.

Considerando todos los valores de los diferentes parámetros analizados, se presenta la Tabla 18, con el fin de comparar y verificar si los valores encontrados en nuestros procesos, están en el rango de parámetros de algunos combustibles, especialmente gasolina y diésel, teniendo en cuenta que estos productos son compuestos obtenidos de la refinación del petróleo crudo. En la Tabla 18 también se encuentra los valores de calidad considerados por el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM) de España, el cual presenta algunos parámetros fisicoquímicos de los crudos.

Tabla 18. Tabla de parámetros fisicoquímicos encontrados y especificaciones técnicas dispuestas para combustibles.

Norma	Gasolina NTE INEN 935	Diésel N° 1 NTE INEN 1489	Crudo (CENEAM, 2016)	Pirólisis	Gasificación
Densidad relativa 15/15 °C (kg/m ³)	n/a	n/a	800-980	934.1	914.7
Viscosidad Cinemática, cSt a 40 °C	n/a	1,3-3	3-100	1.2	1
° API	n/a	n/a	n/a	15	18
Punto de inflamación (°C)	n/a	40	-18 a 190	44	42
Punto de combustión (°C)	n/a	n/a	n/a	48	48
Calor específico (cal/g.°C)	n/a	n/a	n/a	0.6644	0.7273
Punto congelación (°C)	n/a	n/a	n/a	-3	-3

Fuente: Autor.

Según los parámetros técnicos que se plantean en la Tabla 18 con sus respectivas normativas, y fuentes bibliográficas, no se puede verificar si los valores encontrados cumplen con un rango de calidad, por dos cuestiones. 1) Los parámetros fisicoquímicos tanto de la gasolina como el de diésel, no se pueden comparar con los parámetros de los productos obtenidos en los procesos de gasificación y pirólisis, puesto que, tanto el diésel y la gasolina son compuestos refinados provenientes de un proceso de destilación controlada, y los compuestos obtenidos en los dos procesos, es un compuesto crudo, que no ha sido sometido a ningún proceso de purificación. 2) Los parámetros analizados en nuestros productos no se disponen en las normativas de calidad disponibles tanto para gasolina (Anexo 10) como para diésel (Anexo 11). Considerando estos aspectos, se continuó con la comparación de dichos parámetros en relación a valores propio de hidrocarburos crudos dispuestos por la CENEAM.

Los valores comparados entre los parámetros analizados y los de la CENEAM, se muestran en la Tabla 18, en donde solo tres parámetros coincidieron con los nuestros, estos fueron: densidad, viscosidad, y punto de inflamación. De estos tres parámetros, solo la densidad relativa y el punto de inflamación, estaban en el rango óptimo de calidad.

El punto de viscosidad cinemática estaba por debajo de los rangos de calidad planteada por la CENEAM, teniendo en cuenta que dicho parámetro está sujeto a una temperatura de análisis realizada de 40°C y el valor de nuestro análisis de la viscosidad cinemática se realizó a 30°C. Comparando las viscosidades de ambos productos obtenidos con la norma NTE INEN 2070 del 2015, cuyo valor máximo de viscosidad es de 8 cst, se puede decir que nuestros productos cumplen con las especificaciones de la mencionada normativa.

Considerando el punto de congelación y de inflamación, tanto el producto líquido de pirólisis como el de gasificación tuvieron un punto de congelación a los $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, los cuales están dentro del rango máximo ($-47\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la norma NTE INEN 2070 (Anexo 3). De igual manera, el punto de inflamación del producto de pirólisis fue a los $44\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el hidrocarburo de gasificación fue a los $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores que son superiores al valor mínimo ($38\text{ }^{\circ}\text{C}$) que presenta la NTE INEN 2070 (Anexo 3).

En el análisis de los espectros de ambos productos obtenidos en el estudio, se comparó con el espectro de una botella de plástico (Anexo 13), con el fin de observar su variación en el proceso de transformación del PET, esto permitió determinar los compuestos formados. Los espectros tanto de los hidrocarburos de pirólisis y gasificación, fueron muy parecidas en el espectro de la botella de plástico (PET) especialmente en la zona de la huella digital (1500 a 600 cm^{-1}), permitiéndonos afirmar que, los componentes de la botella PET (ácido tereftálico, etilenglicol o dimetil tereftalato), están aún presentes en el hidrocarburo. También se comparó nuestros espectros (Ilustración 3 y 4), con el espectro (Anexo 14) aportado por (Miandad et al., 2017), donde cuyo estudio se basa en obtener hidrocarburos utilizando diferentes tipos de plásticos. Los espectros de pirólisis y gasificación son similares a los espectros de (Miandad et al., 2017), quien afirma que después de un proceso de refinación del hidrocarburo se obtiene diésel que puede ser mezclado en proporciones de 20% con el diésel de uso convencional. Los espectros de nuestros hidrocarburos se compararon con el del diésel convencional (Anexo 15), los cuales no se pudo observar semejanzas en sus curvas FTIR.

Teniendo en cuenta el análisis de los espectros, se puede constatar que; en el espectro del producto de gasificación (Ilustración 4) especialmente en las longitudes comprendidas

entre 1800 y 700 cm^{-1} , se generó muchas más vibraciones (bandas) que en el espectro del producto de pirólisis. Esto permitió indagar que; en el proceso de gasificación, al estar sometido a mayor temperatura y a un agente gasificante, se obtuvo mayores reacciones de despolimerización del PET. En la sección lejana y cercana de los espectros IR de la Ilustración 3 y 4, se tuvo bandas similares en las longitudes 3034 cm^{-1} y en las longitudes comprendidas entre 600 y 800 cm^{-1} , por lo que, mediante la identificación respectiva, se pudo constatar que, los productos de ambos procesos poseían compuestos aromáticos especialmente el benceno. El benceno también es un compuesto aromático identificado por (Arteaga Pérez & Casas Ledón, 2015; Espinoza & Cabrera, 2014) y (Miandad et al., 2017), quienes también afirman que el aceite líquido obtenido en la pirólisis de diferentes plásticos contiene concentraciones de alcanos, alquenos y alcoholes.

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta de que no se encontró información suficiente sobre análisis fisicoquímicos de productos líquidos obtenidos en procesos de gasificación y pirólisis utilizando botellas PET, no se pudo comparar nuestros resultados con otros autores. Sin embargo, se comparó los resultados entre nuestros dos procesos realizados, y de igual manera, con estudios aplicando el mismo método, pero utilizando diferentes tipos de plásticos.

Se pudo constatar que, en los dos procesos los valores de los análisis fisicoquímicos son muy similares, pues la única diferencia que se pudo notar claramente entre ellos es el color y olor. El color del hidrocarburo obtenido en el proceso de pirólisis, fue de un color amarillento oscuro (Fotografía 15), y al percibir su aroma, este se asemejaba a disolvente de baja intensidad. El hidrocarburo del proceso de gasificación presentó un color oscuro

(Fotografía 15) por consecuencia de la combustión incompleta, de igual manera, su olor a disolvente fue más intenso e irritante por presencia de ácido benzoico.

Se pudo sostener que, según los compuestos identificados en los espectros de cada proceso, se pudieron encontrar trazas de compuestos aromáticos (benceno), los cuales permitirían obtener combustibles para vehículos automotores, para ello, se requeriría una alta cantidad de producto y una posterior destilación, para finalmente poder obtener una cantidad considerada de combustibles puros (gasolina, diésel).

Si bien en el proceso de gasificación se obtiene mayor cantidad de producto, no garantiza que se obtenga mayores productos refinados, pues según el espectro de gasificación se forman muchos más compuestos pero que no son especialmente compuestos aromáticos.

Como en toda investigación se busca la factibilidad para una producción a escala mayor, se debe considerar que, este estudio se realizó con un equipo nada sofisticado. Se podría lograr un aumento en la producción de hidrocarburo utilizando PET, teniendo un equipo mucho más elaborado y sofisticado.

Es necesario considerar que, si bien el PET es el plástico que mayor se recolecta a nivel nacional frente a otro tipo de plásticos, se necesitaría conocer el costo en: la obtención de la materia prima (PET), el costo de producción y transformación del hidrocarburo a combustibles refinados (diésel y gasolina). De igual manera, se debe definir el precio que llegaría al consumidor, y poder verificar la demanda en el mercado frente a los combustibles ya disponibles en el país. Hay que considerar que, en el Ecuador, los combustibles para vehículos poseen un subsidio por parte del gobierno nacional, por lo que por ahora nuestro producto no tendría rentabilidad.

6. Recomendaciones

Teniendo en cuenta nuestros hallazgos y la eficiencia de nuestro equipo, se debe mencionar que el diámetro de la tubería utilizada para la recolección del syngas en ambos procesos fue esencial, pues diámetros inferiores a ½ pulgada ocasiona que estos se adhieran en la tubería y se obstruya, formando una masa pastosa de color amarillo como lo ocurrido con (Rejas et al., 2015) el cual impide que los gases circulen. La masa se adhiere a la tubería también cuando el proceso de despolimerización del plástico no es completo o cuando la llave de paso que permite la circulación de los gases se abre por completo (se recomienda girar la llave no más de un 10 % de su abertura total).

Considerando los resultados de (Arteaga, Arenas, & Zapata, 2012), en donde se analiza los gases no condensados en procesos de pirólisis, y que uno de los principales gases es el metano, se plantea de que se realice un estudio con el fin de verificar el rendimiento energético del gas generado en un motor de combustión interna. Esto nace considerando que se pasó una llama en los gases no condensables en el proceso de pirólisis y se tuvo una rápida inflamación del gas. Este estudio que se plantea también se sujeta a los resultados obtenidos por (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017) y (Fakhrhoseini & Dastanian, 2013), quienes mencionan que si se realiza estos procesos con altas presiones se obtiene un rendimiento mayor en producto gaseoso a temperaturas entre 400 y 500 °C.

Se recomienda que para futuros estudios implementando estos procesos, se considere una velocidad de calentamiento lento, pues según (Fakhrhoseini & Dastanian, 2013) señala que una velocidad de calentamiento rápida disminuye la generación de producto líquido. De igual manera, se recomienda que, en próximos estudios de gasificación, la cantidad de agua utilizada como agente gasificante no sea mayor de 1 ml, puesto que, si se agrega mayor

cantidad en el reactor, este no reaccionaba por completo y en el condensador se observaba la presencia de agua mezclado con el hidrocarburo.

Al realizar los análisis fisicoquímicos de los productos obtenidos en los procesos de pirólisis y gasificación, se recomienda que, en el momento de determinar el punto de inflamación se lo realice como el último análisis. Esto, debido a que en el momento de determinar tanto el punto de inflamación como de combustión, en el producto quedan residuos carbonosos los cuales alterarían los resultados en otros análisis.

Si bien las botellas PET son el residuo plástico que más se recolecta a nivel nacional y mundial, pero que sus rendimientos en productos líquidos son muy bajos, se recomienda valorizar el residuo plástico de PS que se genera en la Universidad Politécnica Salesiana. Se recomienda estos estudios puesto a que, según su información el PS es el plástico que mayor rendimiento de producto líquido genera, pudiendo tener una proyección innovadora en la ciudad de Cuenca y en el país.

7. Bibliografía

- Academia-Internet. (2014). Calorimetría. Retrieved from Academia Internet website:
https://www.youtube.com/watch?v=Bc1dB3NuXUo&list=LLH6yDs0w_SUtQHm1yrglzHQ&index=39&t=10s
- AGRO WASTE. (2013). *Gasificación*. Retrieved from <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACIÓN.pdf>

- Arandes, J., Bilbao, J., & López, D. (2013). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28–45. Retrieved from <http://files.juventudargentinasolidaria.webnode.com.ar/200000182-a7dd5a8d64/RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOSpdf.pdf>
- Arce Lucin, J. C., & Suarez Moreno, S. K. (2017). *Obtención y caracterización de combustible a partir de desechos termoplásticos PEBD (Low Density Polyethylene) recolectados en la Universidad de Guayaquil*.
- Arias Bastidas, A., & Ramirez Bayeh, M. (2019). *Análisis Cualitativo de Tableta de Aspirina Mediante espectrometría IR Con Transformada de Fourier*. Retrieved from <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-pamplona/tecnicas-de-analisis-instrumental/informe/informe-analisis-instrumental/3346858/view>
- Arteaga, J., Arenas, E. A., & Zapata, Z. (2012). *Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana*. 10(2), 144–151.
- Arteaga Pérez, L., & Casas Ledón, Y. (2015). *Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación*. (5641), 138–145.
- ASTM. *ASTM D7153: "Método de prueba estándar para el punto de congelación de combustibles de aviación."*, (2015).
- ASTM. *ASTM D1298-12b: "Método de prueba estándar para la determinación de Densidad, Densidad relativa (gravedad específica) o Gravedad API del petróleo crudo y productos líquidos del petróleo por el método del hidrómetro"*. , (2017).
- Balseca Sampedro, O. (2016). *Metodología para el diseño hidrodinámico de oleoducto de crudos pesados*. Escuela Politécnica Nacional.
- Beltran, M., & Marcilla, A. (2011). *Estructura y propiedades de los polímeros*. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/16883>
- Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Retrieved from https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=jxilUUn4_QAC&oi=fnd&pg=PA15&dq=polímeros+de+adición+y+condensación&ots=eBRzauhvxG&sig=xDp5m7fBxrnPqm_iJjeqj8Q28b4&redir_esc=y#v=onepage&q=polímeros de adición y condensación&f=false
- Borge, D., & Agudelo, J. (2010). *Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales*. 95–107.
- Bustamante, B. P. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, Vol. 30, pp. 67–86. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Canale, G. J. (2015). *Materialoteca*. Retrieved from <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=4536702>
- Carey, F. A., & Giuliano, R. M. (2014). *Química orgánica* (9a ed). Mexico, D. F.: McGraw-Hill.
- Castaño Meneses, V. M. (2010). *Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas*. 11(January), 159–168.

- CENEAM. (2016). El petróleo y su comportamiento. Retrieved February 25, 2020, from https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx
- Clavijo M, C., & Fárez M, P. (2018). *Análisis de la logística inversa aplicado al sector de plástico en el cantón Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Cobos, R. R. (2017). El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales. *Boletín Sociedad Española Hidrología Médica*, 31(2), 179–190. <https://doi.org/10.23853/bsehm.2017.0212>
- Coreño Alonso, J., & Méndez Bautista, M. T. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*, 21(4), 291–299. [https://doi.org/10.1016/s0187-893x\(18\)30098-3](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(18)30098-3)
- Cortés Llerena, C. F. (2017). *Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18837/1/CD-8227.pdf>
- COVENIN 2052. *Productos derivados del petróleo. Determinación de la densidad relativa por medio del picnómetro Bingham*. , (1993).
- Crespo Palma, S. M. (2013). *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch*. Escuela Politécnica Nacional.
- Criado, A., & Macia, P. (2015). *Infrarrojo de diésel y biodiésel*. Retrieved from http://www.edu.xunta.gal/centros/iessardineira/system/files/ProyectoDual_BDCuan2015.pdf
- Cuellar Cisneros, M., & Collazos Coronado, Lady. (2014). *Espectroscopia de algunos hidrocarburos de bajo peso molecular*. Retrieved from <http://repositorio.usco.edu.co/bitstream/123456789/1363/1/TH CNEA 0059.pdf>
- Egas, C., Naulin, P. I., Préndez, M., Egas, C., Naulin, P. I., & Préndez, M. (2018). Contaminación urbana por material particulado y su efecto sobre las características morfo-anatómicas de cuatro especies arbóreas de Santiago de Chile. *Información Tecnológica*, 29(4), 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2012.08.031>
- Elisabeth, R. P., & Harold, D. S. (2014). *Técnicas de caracterización estructural, composicional y morfológica de materiales* (Ecoe). Bogotá.
- Espinoza, J. E., & Cabrera, T. M. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustible mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana*. (Universidad Politécnica Salesiana). Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680.pdf>
- Fakhrhoseini, S. M., & Dastanian, M. (2013). Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model. *Hindawi Publishing Corporation*, 1–5. <https://doi.org/487676>
- FAO. (2014). *Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida (BEFS RA)*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-bp852s.pdf>
- Ferrero, M. (2013). Cómo convertir plástico en combustibles. Retrieved from Mindalia Televisión website: https://www.youtube.com/watch?v=1jsSJaqXVZw&list=LLH6yDs0w_SUtQHm1yrglzHQ&inde

x=47&t=1635s

- García, & González S, J. M. (2010). SPSS: Prueba T para muestras independientes. *Universidad de Valencia: Grupo de Innovación Educativa*, 6. Retrieved from https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0701b.pdf
- González, S., & Muños, M. J. (2016). *Reciclaje: Una industria en bruto*.
- Hachi Quintana, J., & Rodríguez Mejía, J. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Hermida, É. (2011). Polímeros. *Materiales y Materias Primas*, 70.
- INEN. NTE INEN 810 "Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos." , (1986).
- INEN. INEN 2634 "Disposición de los desechos plásticos post-consumo." , (2012).
- INEN. NTE INEN 1489: "Productos derivados del petróleo. Diésel." , (2013).
- INEN. NTE INEN 2070 2015: "Productos derivados del petróleo JET A-1. Requisitos." , (2015).
- INEN. NTE INEN 935: "Productos derivados del petróleo. Gasolina." , (2016).
- Intriago Molina, S. K., & Rodríguez Velarde, P. A. (2017). *Degradación térmica de poliestireno en un reactor pirolítico tipo Batch para la producción de combustible alternativo*. Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- IRR. (2015). *Reciclaje Inclusivo Y Recicladores de Base en el Ecuador*.
- JA, D. (2018). Viscosidad dinámica del agua. Retrieved from SCRIBD website: <https://es.scribd.com/document/378745472/viscosidad-dinamica-del-agua-pdf>
- Klein, D. (2014). *Química Orgánica* (1a ed.). Madrid: Panamericana.
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1), 53–59. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>
- Martillo Aseffe, J. A., Lesme Jaén, R., Martínez González, A., Oliva Ruiz, L. O., & Orozco Cantos, L. S. (2019). Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft. *Tecnología Química*, 39(2), 455–470.
- McMurry, J. (2018). *Química Orgánica* (9a ed.). Mexico, D. F.: Cengage.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Rehan, M., Aburizaiza, A. S., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, 69, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.032>
- Mondragón Cortez, P. (2015). Espectroscopia de infrarrojo para todos. In *Neural Regeneration Research*.
- NTE INEN. NTE INEN 1047 "Productos de petróleo. Determinación de los puntos de inflamación. Método tag en copa cerrada " . , (2013).

- Petroleum. (2015). Gravedad API. Retrieved January 31, 2020, from <http://www.petroleum.co.uk/api>
- Pichardo Rubio, D. (2011). *Caracterización de hidrocarburos de diferente gravedad API mediante espectroscopia de infrarrojo (FTIR)*. Instituto Politécnico Nacional.
- Pinedo, A. (2013). *Biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual* (Universidad Nacional de Educación a Distancia). Retrieved from https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf
- Piqué, T. M., & Vázquez, A. (2012). Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 3(2), 62–71. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004
- Rejas, L., Carreón, B., & Ortiz, M. (2015). Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 635–642. Retrieved from http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rcti/v10n11/v10n11_a05.pdf
- Romero Moreira, R. M. (2017). Análisis económico del reciclaje y el cuidado del medio ambiente en el Ecuador. In *Tesis*. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.90.4.644>
- Rubinson, K. A., & Rubinson, J. F. (2000). *Ánalysis instrumental*. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/29025298/Analisis-Instrumental-Judith-F-Rubinson>
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2018). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012001>
- Tangri, N. (2017). *Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos*. Retrieved from <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>
- Tapia, L. (2014). Políticas para gestión integral de plásticos en el Ecuador. *Políticas Para Gestión Integral de Plásticos En El Ecuador*, 1–9. Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/Acuerdo-19.pdf>
- Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos : una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. *2012*, 1–120.
- Tojes Pacheco, J. F. (2015). *Caracterización energética del densificado de aserrín como un biocombustible, pellet, utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso* (Universidad de San Carlos de Guatemala; Vol. 151). <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Vazquez, A., Beltrán, M., Perez, M., & Espinosa, R. M. (2016). El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente. *Researchgate*, (May), 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01033.x>
- Vichique Tecalco, S. (2010). *Reciclaje de envases plásticos de PET, un indicador de desarrollo sustentable: caso municipio de Atizapán de Zaragoza*. Instituto Politécnico Nacional.
- Vijayakumar, A., & Sebastian, J. (2018). Pyrolysis process to produce fuel from different types of plastic - A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 396(1).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/396/1/012062>

Zurita Saltos, D. A. (2013). *Gasificación térmica y catalítica de residuos sólidos PET*.
<https://doi.org/10.1190/segam2013-0137.1>

Anexos

Anexo 1. Termómetro industrial con capacidad de 550°C.



Fuente: Autor.

Anexo 2. Reactor al rojo vivo, a causa de alta temperatura.



Fuente: Autor.

Anexo 3. Requisitos fisicoquímicos Jet A-1.

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo de referencia
Densidad a 15,6°C/15,6 °C	kg/m ³	775	840	ASTM D 1298
Densidad API	API	37	51	ASTM D 1298
Acidez total	mg KOH/g	-	0,10	ASTM D 3242
Aromáticos	% ^a	-	25	ASTM D 1319
Olefinas	% ^a	-	5	ASTM D 1319
Azufre mercaptano	% ^b	-	0,003	ASTM D 3227
Azufre total	% ^b	-	0,30	ASTM D 4294
Corrosión a la lámina de cobre 2h a 100 °C		-	1	ASTM D 130
Destilación:				
10 %	°C	-	205	ASTM D 86
50 %	°C	Reporte	-	ASTM D 86
90 %	°C	Reporte	-	ASTM D 86
Punto final de ebullición	°C	-	300	ASTM D 86
Residuo	% ^a	-	1,5	ASTM D 86
Pérdidas	% ^a	-	1,5	ASTM D 86
Punto de inflamación	°C	38	-	NTE INEN 1047
Punto de congelación	°C	-	-47	ASTM D 7153
Punto de humo, y	mm	18	-	ASTM D 1322
Contenido de Naftaleno	% ^a	-	3	ASTM D 1840
Viscosidad a -20 °C	mm ² /s NOTA 1	-	8	NTE INEN 810
Medición de separación de agua (MSEP)		85 ^c	-	ASTM D 3948
Goma existente	mg/100 mL	-	7	ASTM D 381
Estabilidad térmica: Caída de presión, en 5 h	kPa NOTA 2	-	3,33	ASTM D-3241
Depósito en el tubo de precalentamiento		-	3	ASTM D-3241
Conductividad eléctrica	pS/m ^d	50	600	ASTM D 2624
Calor de combustión neta	MJ/kg NOTA 3	42,8	-	ASTM D 3338
^a Fracción en volumen				
^b Fracción en masa				
^c Sin aditivo				
^d Para combustible aditivado. 1 pS/m = 1 x 10 ⁻¹² x Ω ⁻¹ x m ⁻¹				
NOTA 1 1 cSt = 1 mm ² /s				
NOTA 2 1 mm Hg = 133 Pa				
NOTA 3 MJ/kg Equivale aproximadamente a 18400 Btu/lb				
NOTA 4 Mientras no existan NTE INEN, se utilizarán las Normas ASTM correspondientes.				

Fuente: (INEN, 2015).

Anexo 4. Densidad del agua.

Temperatura °C	Densidad g/mL	Temperatura °C	Densidad g/mL	Temperatura °C	Densidad g/mL
0	0,99987	21	0,99802	40	0,99224
3	0,99999	22	0,99780	45	0,99025
4	1,00000	23	0,99756	50	0,98807
5	0,99999	24	0,99732	55	0,98573
10	0,99973	25	0,99707	60	0,98324
15	0,99913	26	0,99681	65	0,98059
15,56	0,99904	27	0,99654	70	0,97781
16	0,99897	28	0,99626	75	0,97489
17	0,99880	29	0,99597	80	0,97183
18	0,99862	30	0,99567	85	0,96865
19	0,99843	35	0,99406	90	0,96534
20	0,99823	37,78	0,99307	100	0,95838

Fuente:(COVENIN 2052, 1993).

Anexo 5. Factor de corrección (b).

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

Fuente:(Espinoza & Cabrera, 2014).

Anexo 6. Pruebas realizadas en Pirólisis.

Pirólisis			
Número de prueba	Peso PET (g)	Peso Hidrocarburo (g)	Rendimiento (%)
1	15	0.97	6.47
2	15	1.20	8.00
3	15	0.87	5.80
4	15	1.18	7.87
5	15	1.12	7.47
6	15	0.93	6.20
7	15	1.11	7.40
8	15	1.14	7.60
9	15	0.93	6.20
10	15	0.92	6.13
11	15	1.08	7.20
12	15	1.16	7.73
13	15	1.02	6.80
14	15	1.14	7.60
15	15	1.09	7.27
16	15	0.89	5.93
17	15	0.96	6.40
18	15	1.05	7.00
19	15	1.20	8.00
20	15	1.12	7.47
21	15	0.86	5.73
22	15	1.19	7.93
23	15	1.12	7.47
24	15	1.17	7.80
25	15	1.09	7.27
26	15	0.97	6.47
27	15	1.20	8.00
28	15	1.10	7.33
29	15	1.18	7.87
30	15	1.12	7.47
31	15	1.02	6.80
32	15	1.11	7.40
33	15	1.14	7.60
34	15	0.93	6.20
35	15	0.98	6.53
36	15	1.08	7.20
37	15	1.12	7.47
38	15	1.09	7.27
39	15	1.14	7.60
40	15	1.11	7.40
41	15	0.92	6.13
42	15	0.96	6.40

43	15	1.07	7.13
44	15	1.14	7.60
45	15	1.11	7.40
46	15	0.86	5.73
47	15	0.93	6.20
48	15	0.98	6.53
49	15	1.01	6.73
50	15	1.00	6.67
51	15	0.99	6.60
52	15	1.21	8.07
53	15	0.97	6.47
54	15	0.98	6.53
55	15	1.08	7.20
56	15	0.91	6.07
57	15	1.10	7.33
58	15	1.08	7.20
59	15	0.98	6.53
60	15	0.97	6.47
61	15	1.12	7.47
62	15	1.12	7.47
63	15	1.03	6.87
64	15	1.12	7.50
65	15	1.11	7.40
66	15	0.99	6.60
67	15	0.89	5.93
68	15	1.05	7.00
69	15	1.18	7.87
70	15	1.21	8.07
71	15	0.86	5.73
72	15	1.15	7.67
73	15	1.17	7.80
74	15	1.09	7.27
75	15	1.11	7.40
76	15	0.97	6.47
77	15	0.91	6.07
78	15	0.87	5.80
79	15	1.01	6.73
80	15	1.10	7.33
81	15	0.95	6.33
82	15	0.89	5.93
83	15	0.99	6.60
84	15	0.91	6.07
85	15	0.92	6.13
86	15	1.01	6.73
87	15	1.07	7.13
88	15	1.06	7.07
89	15	1.14	7.60
90	15	1.09	7.27

91	15	0.89	5.93
92	15	0.91	6.07
93	15	0.98	6.53
94	15	1.03	6.87
95	15	1.08	7.20
96	15	0.93	6.20
97	15	1.15	7.67
98	15	1.18	7.87
99	15	1.13	7.53
100	15	0.97	6.47

Fuente: Autor.

Anexo 7. Pruebas realizadas en Gasificación.

Gasificación			
Número de prueba	Peso PET (g)	Peso Hidrocarburo (g)	Rendimiento (%)
1	15	3.2	21.33
2	15	2.9	19.33
3	15	2.85	19.00
4	15	2.75	18.33
5	15	3.1	20.67
6	15	3.21	21.40
7	15	3.14	20.93
8	15	2.87	19.13
9	15	3.11	20.73
10	15	2.67	17.80
11	15	2.88	19.20
12	15	2.79	18.60
13	15	2.94	19.60
14	15	2.96	19.73
15	15	3.05	20.33
16	15	2.88	19.20
17	15	2.97	19.80
18	15	3.1	20.67
19	15	2.84	18.93
20	15	3.08	20.53
21	15	2.89	19.27
22	15	2.91	19.40
23	15	2.93	19.53
24	15	2.98	19.87
25	15	2.79	18.60

Fuente: Autor.

Anexo 8. Tablas para la interpretación básica de espectros en la región infrarroja.

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Número de onda e intensidad de absorción
C-H	alquilo	metilo	ν 2850, 2960 cm^{-1} (ambos, de fuerte a medio) δ 1460 cm^{-1} (fuerte), 1380 cm^{-1} (débil)
		metileno	ν 2850, 2925 cm^{-1} (ambos, de fuerte a medio) δ 1470 cm^{-1} (fuerte)
		metino	ν 2890 cm^{-1} (débil)
	vinilo	C=CH ₂	ν 2975, 3080 cm^{-1} (medio) δ 990 y 910 cm^{-1} (fuerte)
		C=CH	ν 3200-3100 cm^{-1} (medio)
		alqueno monosustituido	δ 900, 990 cm^{-1} (ambos fuertes)
		alqueno cis-disustituido	δ 670-700 cm^{-1} (fuerte)
		alqueno trans-disustituido	δ 965 cm^{-1} (fuerte)
		alqueno trisustituido	δ 800-840 cm^{-1} (fuerte a medio)
	aromático	benceno/benceno sustituido	ν 3150-3050 cm^{-1} (débil) δ fuera del plano 950-650 cm^{-1} , dependiendo de la sustitución:
		benceno monosustituido	770-730 cm^{-1} (fuerte) y 700±10 cm^{-1} (fuerte)
		benceno orto-disustituido	770-735 cm^{-1} (fuerte)
		benceno meta-disustituido	810-750 cm^{-1} (fuerte) y 710-690 cm^{-1} (fuerte)
		benceno para-disustituido	840-790 cm^{-1} (fuerte)
	alquino		ν 3325-3250 cm^{-1} (medio) δ 750-650 cm^{-1}
	aldehído		Resonancia de Fermi 2720, 2820 cm^{-1} (medio)

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Número de onda e intensidad de absorción
O-H	alcoholes, fenoles		ν 3650-3200 cm^{-1} banda ancha por polimerización δ 1500-1300 cm^{-1} y 650 cm^{-1}
	ácidos carboxílicos		ν 3000-2500 cm^{-1} δ_{OH} 1420 cm^{-1} δ_{COOH} 1300-1200 cm^{-1}
N-H	aminas	R-NH ₂	ν 3500 cm^{-1} (2 bandas fuertes en aminas primarias, 1 banda de medio a débil en aminas secundarias)
		Ar-NH ₂	ν 3400 cm^{-1} (2 bandas fuertes en aminas primarias, 1 banda de medio a débil en aminas secundarias) δ 1560-1640 cm^{-1} (fuerte)
		-NH ₂	δ en el plano 1560-1640 cm^{-1} (fuerte) δ fuera del plano 900-650 cm^{-1}
	iones amonio		se ensancha con múltiples picos entre 2400-3200 cm^{-1}
C=C	C=C acíclico	Vinilo, metileno terminal, cis, trans	ν 1640-1680 cm^{-1} (medio)
		alqueno tri y tetrasustituido	ν 1670 cm^{-1} (débil)
C=C	C=C conjugado	Dienos, polienos	ν 1600-1650 cm^{-1} (fuerte)
		con anillo de benceno	ν 1625 cm^{-1} (fuerte)
C=C		con C=O	ν 1600 cm^{-1} (fuerte)
	C=C aromático		ν 1450, 1500, 1580, 1600 cm^{-1} (fuerte a débil) - siempre los 4
	C≡C	alquino terminal	ν 2100-2140 cm^{-1} (débil)
		alquino disustituido	ν 2190-2260 cm^{-1} (muy débil, a veces no visible)

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Número de onda e intensidad de absorción
C=O	cetona/aldehído	alifáticos saturados/ciclos de 6 miembros	v 1720 cm ⁻¹
		α,β-insaturado	v 1685 cm ⁻¹ (también va para cetonas aromáticas)
		ciclo de 5 miembros	v 1750 cm ⁻¹
		ciclo de 4 miembros	v 1775 cm ⁻¹
		aldehído	v 1725 cm ⁻¹ (influencia de la conjugación como en las cetonas)
	derivados de ácido carboxílico	ácido carboxílico saturado	v 1725-1700 cm ⁻¹
		ácido carboxílico insaturado/aromático	v 1680-1690 cm ⁻¹
		ésteres y lactonas	v 1750-1735 cm ⁻¹ (influencia de la conjugación y el tamaño del anillo como en las cetonas)
		anhídridos	v 1760 (sim) y 1820 (asim) cm ⁻¹ (ambos)
		halogenuros	v 1800 cm ⁻¹
		amidas	v 1670-1640 cm ⁻¹ (amidas asociadas)
		sales de carboxilatos	v 1550-1610 cm ⁻¹ (también va para zwitteriones aminoácidos)
	C-O	alcoholes	primarios
secundarios			v alrededor de 1100 cm ⁻¹
terciarios			v 1150-1200 cm ⁻¹
fenoles			v 1200 cm ⁻¹
éteres		Alifáticos y cíclicos	v 1150-1070 cm ⁻¹
		Aromáticos y vinílicos	1275-1200 cm ⁻¹
ácidos carboxílicos			δ 1250-1300 cm ⁻¹
ésteres			v simétrico y asimétrico. Dos bandas entre 1300-1050 cm ⁻¹ . Banda de mayor intensidad: 1180 cm ⁻¹ formiato, 1240 cm ⁻¹ acetato, 1190 cm ⁻¹ alquil éster, 1165 cm ⁻¹ metil éster

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Número de onda e intensidad de absorción
C-N C=N C=C	aminas alifáticas		ν 1020-1220 cm^{-1} (frecuentemente sobrepuestas)
	Grupo nitro		ν 870 cm^{-1}
	C=N		ν 1615-1700 cm^{-1} (efectos de conjugación similares a C=O)
	nitrilos (enlace triple C-N)		ν 2210-2260 cm^{-1} (no conjugado 2250, conjugado 2230 cm^{-1})
	isonitrilos (enlace R-N-C)		ν 2165-2110 cm^{-1} (2140 - 1990 cm^{-1} para R-N=C=S)
C-X (X=F, Cl, Br, I)	fluoroalcanos	ordinarios	ν 1000-1100 cm^{-1}
		trifluorometilo	ν dos fuertes, se ensancha entre 1100-1200 cm^{-1}
	cloroalcanos		ν 540-760 cm^{-1} (medio to débil)
	bromoalcanos		ν abajo de 600 cm^{-1}
	iodoalcanos		ν abajo de 600 cm^{-1}
N-O	compuestos nitro	alifático	ν 1550 cm^{-1} (asim) (más fuerte) y 1370 cm^{-1} (sim) (más débil) - Siempre ambas.
		aromático	ν 1520 (asim), 1350 cm^{-1} (sim) (la conjugación usualmente baja el número de onda)

Fuente: (Rubinson & Rubinson, 2000).

Anexo 9. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas.

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734	68	0,000416
1	0,001731	35	0,000720	69	0,000410
2	0,001674	36	0,000705	70	0,000404
3	0,001620	37	0,000692	71	0,000399
4	0,001569	38	0,000678	72	0,000394
5	0,001520	39	0,000666	73	0,000388
6	0,001473	40	0,000653	74	0,000383
7	0,001429	41	0,000641	75	0,000378
8	0,001386	42	0,000629	76	0,000373
9	0,001346	43	0,000618	77	0,000369
10	0,001308	44	0,000607	78	0,000364
11	0,001271	45	0,000596	79	0,000359
12	0,001236	46	0,000586	80	0,000355
13	0,001202	47	0,000576	81	0,000351
14	0,001170	48	0,000566	82	0,000346
15	0,001139	49	0,000556	83	0,000342
16	0,001109	50	0,000547	84	0,000338
17	0,001081	51	0,000538	85	0,000334
18	0,001054	52	0,000529	86	0,000330
19	0,001028	53	0,000521	87	0,000326
20	0,001003	54	0,000512	88	0,000322
21	0,000979	55	0,000504	89	0,000319
22	0,000955	56	0,000496	90	0,000315
23	0,000933	57	0,000489	91	0,000311
24	0,000911	58	0,000481	92	0,000308
25	0,000891	59	0,000474	93	0,000304
26	0,000871	60	0,000467	94	0,000301
27	0,000852	61	0,000460	95	0,000298
28	0,000833	62	0,000453	96	0,000295
29	0,000815	63	0,000447	97	0,000291
30	0,000798	64	0,000440	98	0,000288
31	0,000781	65	0,000434	99	0,000285
32	0,000765	66	0,000428	100	0,000282

Fuente: (JA, 2018).

Anexo 10. Requisitos de la gasolina de 87 octanos.

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Número de octano Research (RON) ^a	--	87	--	NTE INEN 2102
Destilación: 10 %	°C	--	70	ASTM D86
50 %	°C	77	121	ASTM D86
90 %	°C	--	189	ASTM D86
Punto final	°C	--	220	ASTM D86
Residuo de destilación	% ^b	--	2	ASTM D86
Relación vapor – líquido a 60 °C	--	--	20	ASTM D5188
Presión de vapor	kPa	--	60	ASTM D323 ASTM D4953 ASTM D5191
Corrosión a la lámina de cobre (3 h a 50 °C)	--	--	1	ASTM D130
Contenido de gomas	mg/100 mL	--	3	ASTM D381
Contenido de azufre	% ^c	--	0,065	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453
Contenido de aromáticos	% ^d	--	30	ASTM D1319
Contenido de benceno	% ^d	--	1	ASTM D3606 ASTM D5580 ASTM D6277 ASTM D6730
Contenido de olefinas	% ^d	--	18	ASTM D1319
Estabilidad a la oxidación	min	240	--	ASTM D525 ASTM D7525
Contenido de oxígeno	% ^c	--	2,7	ASTM D4815 ASTM D5845
Contenido de plomo	mg/L	--	No detectable	ASTM D3237 ASTM D5059 ASTM D5185
Contenido de manganeso	mg/L	--	No detectable	ASTM D3831 ASTM D5185
Contenido de hierro	mg/L	--	No detectable	ASTM D5185

Fuente: (INEN, 2016).

Anexo 11. Requisitos del diésel premium.

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491
W contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2,0	5,0	NTE INEN 810
W contenido de azufre	%	-	0,05	ASTM 4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel, φ Biodiésel	%	---	5	EN 14078
NOTA. De no contener biodiésel, no es necesario la realización de este ensayo.				

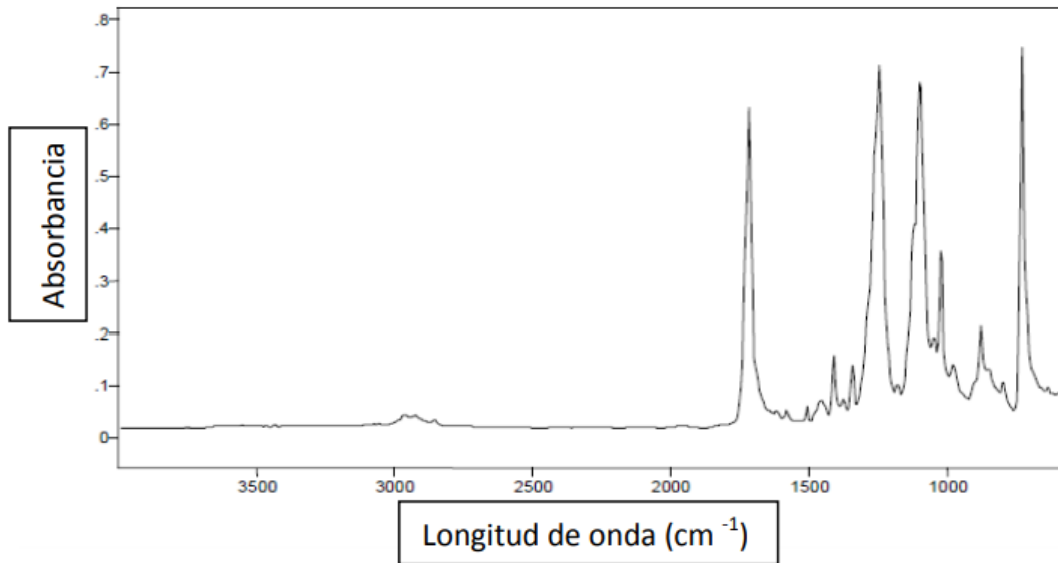
Fuente: (INEN, 2013).

Anexo 12. Producto de PET



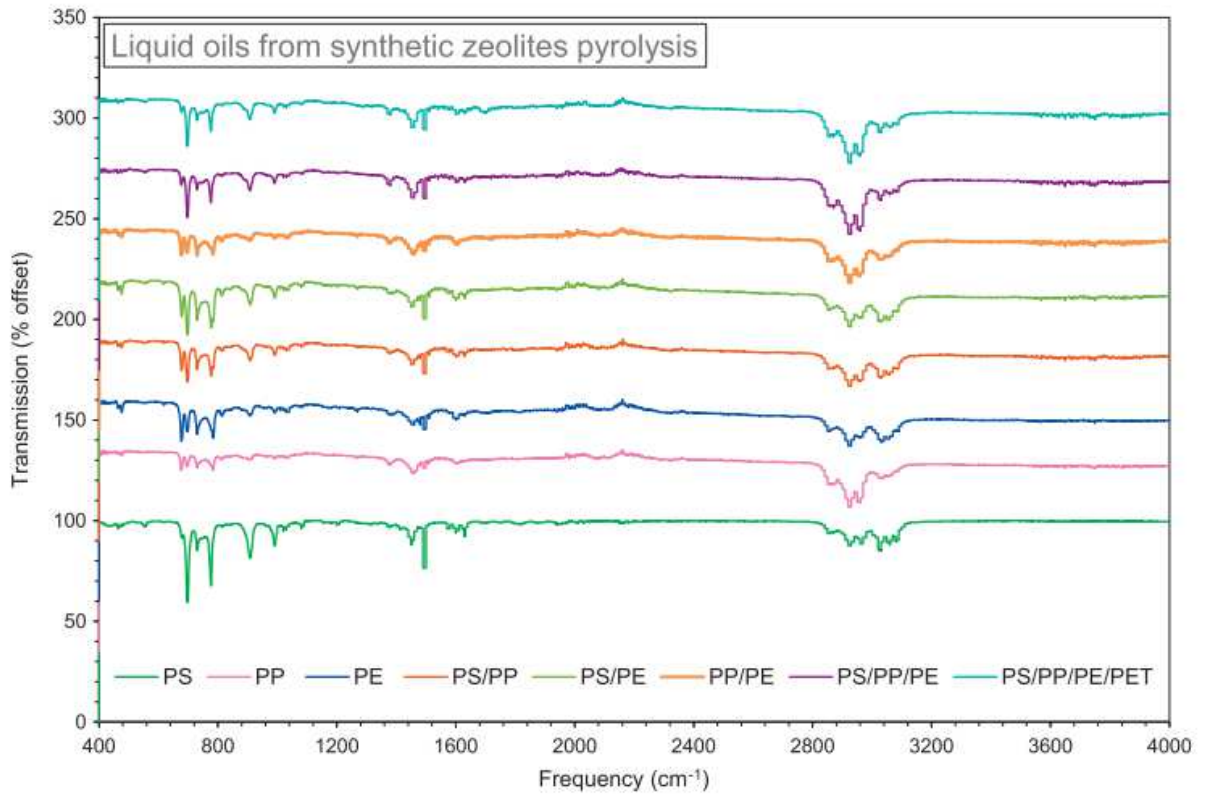
Fuente: (Espinoza & Cabrera, 2014).

Anexo 13. Espectro FTIR de botella plástica (PET).



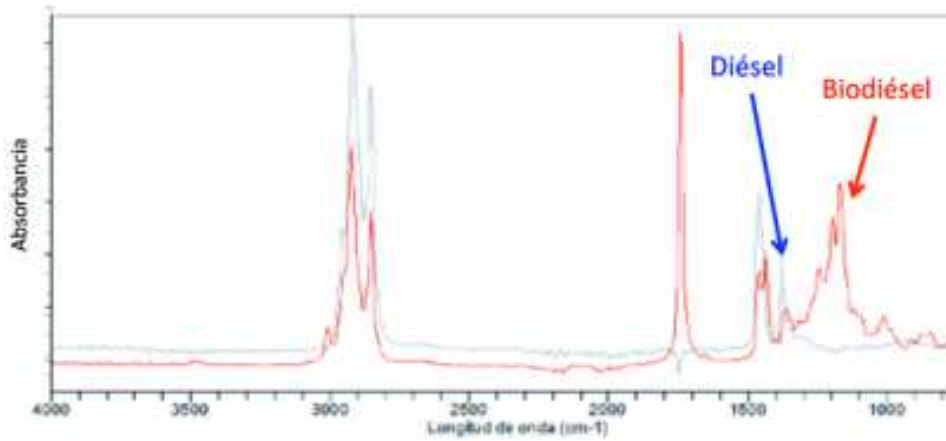
Fuente: (Cuellar Cisneros & Collazos Coronado, 2014).

Anexo 14. Espectros de productos líquidos obtenidos en la pirólisis con zeolita sintética.



Fuente: (Miandad et al., 2017).

Anexo 15. Espectro FTIR de Diésel y Biodiésel.



Fuente: (Criado & Macía, 2015).