



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

DISEÑO DE UN PROCESO PARA EL RECICLAJE DEL POLIETILENO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

SUSTENTANTE:

GARCÍA MARTÍNEZ SUSANA ARELY

201621218

Asesor:

Dra. María Teresa Torres Mancera

COACALCO DE BERRIOZABAL, MÉX. JULIO, 2024

ÍNDICE

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	8
<i>INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>8</i>
<i>JUSTIFICACIÓN.....</i>	<i>10</i>
<i>ANTECEDENTES.....</i>	<i>14</i>
<i>OBJETIVOS.....</i>	<i>22</i>
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	26
<i>TIPOS DE RESIDUOS PLÁSTICOS.....</i>	<i>26</i>
<i>PROCESOS DE RECUPERACIÓN QUÍMICA.....</i>	<i>63</i>
CAPÍTULO III. DESARROLLO.....	95
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	95
CONCLUSIONES.....	132
RECOMENDACIONES.....	133
FUENTES DE INFORMACIÓN.....	134
Bibliografía.....	134
ANEXOS.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- Simbología de identificación para plásticos (Society of the Plastics Industry)	28
TABLA 2: Propiedades de polietileno sólido (Juan Conesa, 1996)	35
TABLA 3: Intervalos de densidades de plásticos comunes (Alvarez, 2009)	47
TABLA 4: Constantes dieléctricas de plásticos seleccionados a 1 MHz (Alvarez, 2009)	50
TABLA 5: Condiciones de acuerdo al tipo de pirólisis (Mendoza, 2015)	77
TABLA 6: Utilidad de los productos de pirólisis (Espinoza Merchán, 2014)	79
TABLA 7: Comparación de métodos químicos	87
TABLA 8: Características del separador (Graf, 2022)	93
TABLA 9: Características del intercambiador de calor (Tranter, 2022).....	94
TABLA 10: Características molino de cuchillas MODELO VMPC-600FILM (Asian Machiney USA, 2022).....	102
TABLA 11: Comparación de sistemas de secado (Saigh, 2005)	108
TABLA 12: Partes de la línea de lavado-secado de plástico (Saigh, 2005)	108
TABLA 13: Características del reactor (BELAIK, 2020)	113
TABLA 14: Resultados de la simulación sin contaminantes	122
TABLA 15: Resultados de la simulación con poliestireno y cloruro de vinilo.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Producción mundial de plástico, 1950-2012 (Europe, 2019).....	16
FIGURA 2: Uso de plástico en la Unión Europea durante la pandemia por COVID (Arévalo, 2021). 18	
FIGURA 3: Plásticos usados para envases y empaques en México 2016 (ECOCE,.....)	19
FIGURA 4: Composición de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de México (ECOCE, 2017).....	21
FIGURA 5: Composición de residuos plástico urbanos (ECOCE, 2019).....	22
FIGURA 6: Códigos de identificación de envases (Martin, 2020)	25
FIGURA 7: La ecuación general de la polimerización del etileno (Torres Velazquez, 2019).	34
FIGURA 8: Esquema de las diferentes estructuras de polietilenos (W.L., 1984)	35
FIGURA 9: Porcentaje de plásticos en rellenos sanitarios (PGIR, 2021-2025).....	40
FIGURA 10: Métodos de disposición final	(A. K. Panda, 2010).....41
FIGURA 11: Separación manual de residuos sólidos (Heredia, 2021).....	47
FIGURA 12: Sistema de separación por color Mistilinea 5000 LB/HR (Alvarez, 2009).....	50
FIGURA 13: Equipo de separación triboeléctrico (Alvarez, 2009)	52
FIGURA 14: Esquema de un sistema NIR (Alvarez, 2009)	53
FIGURA 15: Componentes de la trituradora (José Emmanuel Medina García, 2011).....	55
FIGURA 16: Lavadora con aletas (Daza, 2019).	58
FIGURA 17: Partes de una secadora (Daza, 2019).	60
FIGURA 18: Retención (Daza, 2019)	61
FIGURA 19: Secador por aire seco (industry, 2017)	62

FIGURA 20: Secador centrífugo (plástico, 2018).	63
FIGURA 21: Partes de una secadora, máquina de secado, soplador y serpentín de tubo. (plástico, 2018).	64
FIGURA 22: Tratamiento térmico de plásticos (Mastellone, 1999).....	65
FIGURA 23: Esquema de proceso de gasificación (VARGAS-SANTILLÁN, 2019)	67
FIGURA 24: Proceso de gasificación (Saltos, 2013).....	68
FIGURA 25: Esquema de despolimerización química (Prieto M. A., 2020).....	71
FIGURA 26: Diagrama de bloques de metanólisis (Carlos, 2004)	71
FIGURA 27: Diagrama de bloques del método de Glicólisis (Mariano, 2011).	74
FIGURA 28: Diagrama del proceso de pirólisis (Otto Fernando, 2021).	75
FIGURA 29: Esquema de diferencia entre pirólisis lenta y rápida (Casas, 2014).	77
FIGURA 30: Diagrama de bloques del proceso de pirolisis (Noguera, 2020).....	79
FIGURA 31: Separador modelo DC1,5 (Graf, 2022.....	94
FIGURA 32: Intercambiador de calor modelo SUPERMAX (Tranter, 2022)	95
FIGURA 33: Representación del esquema de una economía circular (ANUIES, 2021).	98
FIGURA 34: Partes de una banda transportadora (José Armando Castro Medina, 2011)	100
FIGURA 35: Banda transportadora de alimentación a molino triturador (SICSA BANDAS,2021)....	101
FIGURA 36: Molino de cuchillas MODELO VMPC-600FILM (Asian Machiney USA, 2022).....	102
FIGURA 37: Partes del molino (Mauricio F, et al 2009).....	104
FIGURA 38: Foto externa del sistema de lavado modelo TQA1000LNPTVAP (Copyright, 2018).....	106
FIGURA 39: Modelo interno del sistema de lavado modelo TQA1000LNPTVAP RF5. (Copyright, 2018)	107
FIGURA 40: Esquema de operación de un secador de aire caliente (Saigh, 2005)	108

Figura 41: Costo de inversión para los diferentes procesos (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009).....	110
Figura 42: Costos de operación en cada proceso (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009).	111
Figura 43: Requerimiento energético de cada uno de los procesos (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009).	112
FIGURA 44: Reactor de pirólisis de residuos plástico marca BESTON (BELAIK, 2020).....	114
FIGURA 45: Diagrama de bloques aspen de la simulación de pirólisis.	118
FIGURA 46: Ventana selección componentes de la simulación	120
FIGURA 47: Ventana introducción variables termodinámicas de entrada.....	121
FIGURA 48: Especificaciones del módulo.	121
Figura 49: Selección de estequiometría o cinética.....	122
FIGURA 50: Selección del método	124
FIGURA 51: Selección de componentes	125
FIGURA 52: Selección de condiciones de entrada	125
FIGURA 53: Selección de condiciones del reactor	126

Agradecimientos.

A mi familia

Quiero agradecer a mi familia, quienes a lo largo de mi vida me han dado las herramientas necesarias para desarrollarme en sociedad, brindándome las herramientas necesarias que me ayudaron a alcanzar mis metas.

Gracias por enseñarme a no rendirme.

Institución

Quiero agradecer al grupo docente que me brindo un aprendizaje constante el cual me ayudó a forjar valores necesarios para un desarrollo profesional; mismos que me han ayudado estos años en mi desarrollo profesional.

De manera especial agradezco a mi asesora la Dra. María Teresa Torres Mancera y quien ha sido parte importante en el desarrollo del presente trabajo.

Resumen:

El presente trabajo es una investigación sobre el consumo de polímeros más utilizados en México, su importancia, el impacto ambiental y la problemática que representan los diferentes métodos existentes de reciclaje.

De la investigación realizada, el polietileno es el polímero más utilizado por sus bajo coste y características fisicoquímicas, que le permiten ser utilizado en gran variedad de aplicaciones en diferentes industrias, donde podemos encontrarlo como aislante, recubrimientos, embalaje de alimentos, laminados, etc.

Este polímero puede reciclarse de forma mecánica y química, sin embargo, no existe la capacidad que pueda enfrentar el posconsumo de dicho material, motivo principal por el cual que afecta al medio ambiente, ya que no es degradable.

Se optó por proponer el método de pirólisis como medio de recuperación, al ser el que genera menos contaminantes con alto porcentaje de gases de síntesis. En la actualidad existen iniciativas que están apostando a invertir en plantas de pirólisis para recuperación de polímeros como BAF y la asociación ECOCE, mismas que ayudaran a reducción el impacto ambiental de estos materiales.

La recuperación pirolítica de mezcla de polímeros genera residuos sólidos carbonosos, líquidos hidrocarbonados, gases compuestos por hidrogeno, óxidos de carbono e hidrocarburos. La composición del gas dependerá de las condiciones en las que se lleva a cabo la pirólisis (Alvarez, 2009). Obteniendo en la fase gaseosa compuestos como H_2 , CO, CO_2 , gases ácidos como HCl y SO_2 , amoníaco, agua, metales pesados volátiles, nitrógeno azufre e hidrocarburos gaseosos (Alvarez, 2009). El principal componente peligrosos son derivados como el Cl_2 , por lo cual se hace hincapié en la importancia de tener incluido en el proceso la recuperación mecánica, ya que garantiza la separación correcta de polietileno para reducir la producción de contaminantes derivados del policloruro de vinilo.

Se realizan dos simulaciones en ASPEN, simulación sin contaminantes donde se obtuvieron gases de combustión (etileno, metano, etano, propano y butano) sin contaminantes y al realizar la simulación con policloruro de vinilo y polietileno, se obtuvieron derivados de Cl_2 los cuales son nocivos para la salud y requieren ser tratados como residuos peligrosos.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

Los polímeros tienen usos diversos gracias a sus características fisicoquímicas que les permiten ser utilizados en múltiples actividades cotidianas, industriales y de diversos sectores, motivo por el cual la producción mundial de plásticos ha crecido y generado globalmente un serio problema de acumulación de desechos, ya que no se cuenta con un programa de tratado post uso de estos materiales que abarque todo el desecho que se ha generado y que se va generando día a día.

Los polímeros gracias a su versatilidad tienen una amplia aplicación en todos los sectores. En los últimos años debido a la pandemia producida por el coronavirus SARS-CoV-19, se ha aumentado la producción y el consumo de plásticos, por lo que su desecho representa una problemática a enfrentar. En Singapur, durante un cierre de ocho

semanas, se generaron 1470 toneladas adicionales de desechos plásticos solo a partir de envases para llevar (Fussstetter, 2021). En Wuhan, China, los desechos médicos aumentaron seis veces a 240 toneladas por día durante la pandemia, sobrecargando la capacidad de incineración de la ciudad de 49 toneladas diarias (Fussstetter, 2021). Un solo hospital en Jordania produjo diez veces más desechos médicos por día, con solo 95 pacientes de COVID-19, de lo que normalmente produce (Fussstetter, 2021). Con el confinamiento en México la producción de residuos aumentó de manera significativa: la basura doméstica de 3.5 a 17 por ciento, en tanto que los desechos tipo biológico-infecciosos lo hicieron hasta en 300 por ciento, informó Nancy Jiménez Martínez, del Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM) de la UNAM (Martínez, 2021).

Los polímeros más utilizados en la industria para envases suelen ser el Polietileno (PE), Poliestireno (PS), Polipropileno (PP), Copolímeros (EVA, EVOH, PVA,...), Poliésteres (PET, PETG, PBT PEN), Poliamidas (PA), Polímeros vinílicos (PVC, PVdC), Policarbonatos entre otros (Fantoni, 2003).

Para enfrentar este problema se han estudiado distintas vías de reciclaje, siendo el reciclaje químico es uno de los caminos a seguir más estudiado, pues permite transformar el desecho plástico en un nuevo compuesto o materia prima (como combustibles o monómeros).

Entre los métodos de recuperación de polímeros se encuentra el reciclaje químico, el cual como ventajas ofrece la reducción de volumen de RSU, obtención de gases de combustión, entre otros. Las desventajas de este tipo de recuperación es que se necesita una elevada inversión en tecnología, emisión de contaminantes.

En el presente trabajo se analiza los diferentes tipos de polietileno como el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietilentereftalato (PETE) y el poliestireno (PS), su aplicación industrial y la importancia de su recuperación para poder reducir la huella de carbono. Se resaltaré la importancia de recuperar este

polímero solo y no como mezcla para evitar la emisión de contaminantes clorados y garantizar una alta calidad en la obtención de gases de combustión.

De las diversas formas de reciclaje químico, el de pirólisis catalítico exhibe las mayores economías de escala al ser un proceso térmico simple y aplicable a una gran variedad de polímeros, en la que los sólidos ácidos, como las zeolitas, han sido identificados como excelentes catalizadores.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los plásticos son esenciales en sectores como la construcción, medicina, ingeniería, automotriz, hogares, etc. Gracias a su amplia aplicación juega un papel importante en la vida cotidiana debido a sus características químicas, mecánicas y su bajo costo de producción aumenta la demanda del producto, haciendo que la recuperación de desechos plásticos no sea satisfactoria lo cual dificulta el manejo de este desecho, ya que representa un gran volumen y al no ser degradable genera una problemática.

Las características fisicoquímicas de los plásticos hacen que tengan una gran aplicación en los muchos sectores, sin embargo, sus características y la mala recuperación del material han generado que el uso de estos materiales cause una problemática ambiental.

Este proyecto consiste en dar una alternativa para reducir los desechos de polietileno en rellenos sanitarios, proponiendo un método de recuperación mecánica que garantice la eliminación de contaminantes del polietileno, para que este sea la materia prima principal para el proceso de pirólisis y de esta manera reprocesar la mayor cantidad del material para la obtención de gases de combustión.

PROBLEMÁTICA

La principal problemática que se encuentra es que no existe una correcta separación de residuos sólidos urbanos, lo cual provoca que se tenga una mezcla de materia prima contaminada con materiales que afectan de forma negativa su correcta recuperación.

En el caso particular de México los residuos sólidos urbanos no han recibido la atención adecuada debido a una serie de factores de diversa índole, entre los cuales destacan:

- Recolección de la basura mezclada (en el 95% del territorio nacional)
- Servicios públicos de limpia insuficientes e ineficientes
- Escasa coordinación entre los distintos niveles de gobierno
- Marco jurídico incompleto y labor legislativa con visión particularizada
- Pasividad en materia ecológica y escasa cultura del reciclaje en la sociedad
- Dependencia de los precios internacionales de los residuos que sirven de materia prima, lo que deriva en acopio por temporadas

En la mayor cantidad de materia prima polimérica utilizada en la producción de envases es una mezcla de Poliestireno (PS), Polietileno (PE) y cloruro de polivinilo (PVC) (ARPET, 2017). En esta mezcla el cloruro de polivinilo es un contaminante potencial al generar residuos clorados y el polietileno es el polímero que ofrece la mayor cantidad generación de gases de síntesis en la recuperación pirolítica.

Al ser el polietileno es un material que representa más beneficios se escoge para el estudio de esta investigación, ya que, al ser un material muy versátil, que tiene propiedades que le permiten tener una gran variedad de aplicaciones gracias a sus propiedades químicas y mecánicas, donde el costo de su producción es muy bajo, por lo

que se vuelve un polímero de alto consumo representando una problemática en los rellenos sanitarios.

Este polímero puede reciclarse de forma mecánica o química, sin embargo, no existe la capacidad de reciclaje que pueda enfrentar el consumo de dicho material. Por este motivo es un material que afecta al medio ambiente, ya que no es degradable.

La problemática que genera el consumo del polietileno es una contaminación ambiental, emisión de gases invernadero en su descomposición al medio ambiente. Ya que su vida útil es corta los volúmenes crecen rápidamente en los rellenos sanitarios y ya que su degradación larga representa un volumen que debe reducirse. Es importante analizar los diferentes tipos de recuperación y generar una optimización en la recuperación del polietileno, ya que en la actualidad estos métodos requieren una alta inversión económica y no se tienen suficientes empresas para abastecer la demanda de reciclaje.

En la actualidad derivado de la pandemia por COVID-19 estamos enfrentando una crisis mundial de contaminación por plásticos. No solo cubrebocas y guantes, también empaques de plástico de comida y otros productos agravan la problemática llevando los plásticos a regiones remotas como el ártico y al fondo de los océanos.

Se indica que, en el futuro, menos del 10% de los plásticos utilizados durante la pandemia se reciclarán alguna vez, y más del 70% llegará a los vertederos o al medio ambiente (Jensen, 2021).

Recientemente en un estudio realizado en la Universidad de Hawái informaron que los plásticos al descomponerse emiten metano y etileno. Las emisiones ocurren cuando los materiales plásticos están expuestos a la radiación solar ambiental, ya sea en el agua o en el aire, pero en el aire, las tasas de emisión son mucho más altas (Roya, 2018).

Los investigadores probaron policarbonato, acrílico, polipropileno, tereftalato de polietileno, poliestireno, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad, materiales utilizados en envases de alimentos, textiles, materiales de construcción y

diversos artículos de plástico. Siendo el polietileno de baja densidad quien emite estos gases cuando es incubado en el aire a velocidades aproximadamente 2 y 76 veces más altas que cuando se incubaba en agua, en el caso del metano y el etileno (Roya, 2018).

CONTAMINACIÓN DEL MAR POR PLÁSTICOS

En la actualidad, a nivel global, la principal causa de morbilidad es la contaminación. La degradación ambiental por la acumulación de contaminantes compromete la existencia de los seres vivos, incluido el hombre. El tema de los residuos sólidos urbanos cobra relevancia, ya que una gestión integral de residuos sólidos tiende a minimizar el impacto de estos en la naturaleza.

En los últimos años se ha identificado que el mayor contaminante del mar es el plástico. De acuerdo a datos de National Geographic 45, se estiman las siguientes cifras:

- Más de 5 billones (5,000 millones: 5×10^9) de fragmentos de plástico están flotando en los océanos.
- Aproximadamente 73% de la basura en las playas es de plástico.
- Unas 700 especies de animales marinos han consumido o han quedado atrapadas en plástico.
- En 2050:
 - Casi todas las especies de aves marinas del planeta comerán plástico.
 - En el mar habrá más plástico que peces.

- 100 mil animales marinos mueren cada año por consecuencia de la contaminación por basura marina, de las cuales el 80% son plásticos.
- En el mundo, cada minuto se vende casi un millón de envases de plásticos de bebidas.
- Más del 40% de plásticos se usa una sola vez y se tira.

ANTECEDENTES

Inicialmente la fabricación del plástico se realizaba a partir de polímeros y resinas vegetales, como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena) o los aceites de semillas. La caseína de la leche fue uno de los materiales no vegetales que también se usó con este fin. Estos materiales ya se utilizaban en Egipto, Babilonia, India, Grecia y China (Ferretería, 2011).

Las culturas americanas, como los mayas, obtenían el jugo lechoso y pegajoso de las plantas del caucho para preparar una pasta elástica y correosa (látex) que usaban para sellar vasijas y confeccionar calzado o las bolas que se usaban en el ritual del juego de pelota (Interempresas, 1999)

El primer polímero sintético fue fabricado por el norteamericano Leo Baekeland en 1907, al cual le puso por nombre baquelita (Tarragona, 1991). Durante las investigaciones realizadas en la segunda guerra mundial se desarrollaron nuevos plásticos, apareciendo el polietileno de alta densidad en 1955, este polietileno fue sintetizado por primera vez por el químico alemán Hans von Pechmann quien por accidente lo creó mientras calentaba diazometano (Tarragona, 1991).

El 27 de marzo de 1933 fue sintetizado como lo conocemos hoy en día, por Reginald Gibson y Eric Fawcett en Inglaterra, quienes trabajaban para los Laboratorios ICI. Esto fue logrado aplicando una presión de aproximadamente 1400 bar y una temperatura de 170 °C, donde fue obtenido el material de alta viscosidad y color blanquecino que hoy en

día se conoce. Este fue el primer Polietileno con aplicaciones industriales. Las investigaciones sobre este material se detuvieron durante la Segunda Guerra mundial, aunque este producto encontró algunas aplicaciones militares como recubrimiento de cables coaxiales para radares (Packsys, 2012).

La presión requerida para lograr la polimerización del etileno era demasiado alta, por ello es que la investigación sobre catalizadores realizada por el Alemán Karl Ziegler y el italiano Giulio Natta, que dio origen a los catalizadores Ziegler-Natta valió el reconocimiento del más famoso premio a la ciencia a nivel mundial, el premio Nobel en 1963 por su aporte científico a la química. Con estos catalizadores se logra la polimerización a presión normal (Packsys, 2012).

Como puede observarse en la figura 1 la producción de plástico ha mantenido un crecimiento constante desde 1950. En dicho año se registró una producción de 1.7 millones de toneladas; luego tuvo un incremento de 13.6% promedio anual durante 26 años. A partir de 1976, el crecimiento ha sido más moderado, pero aún muestra tasas interanuales relativamente altas.

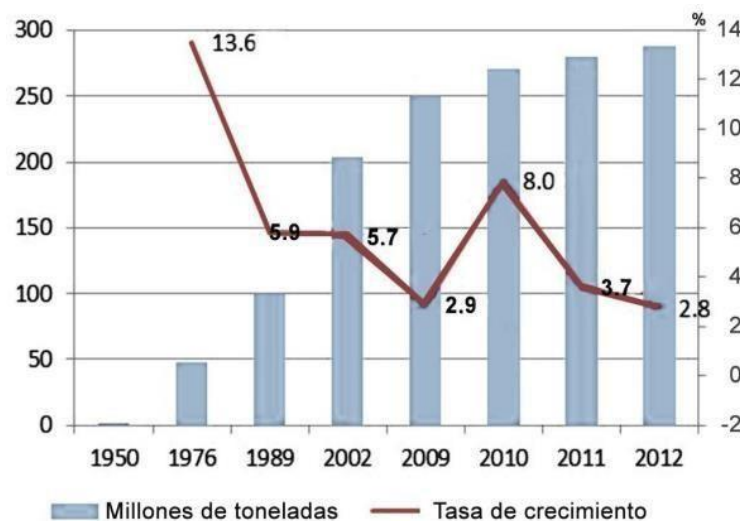


FIGURA 1: Producción mundial de plástico, 1950-2012 (Europe, 2019)

Actualmente los productos plásticos se consumen de manera cotidiana en diferentes sectores, podemos encontrarlos en ropa, muebles, artículos de oficina, accesorios de carros, construcciones, etc. Este uso amplio es derivado a la versatilidad de los usos que pueden tener por sus características físicas y químicas. Actualmente los productos plásticos forman parte fundamental de la economía mundial, representando generación de fuentes de empleo y ganancias económicas.

El consumo y desecho no regulado de plásticos ha generado problemas ambientales que deben ser solucionados ya que son una amenaza a la biodiversidad en el planeta. La evaluación, publicada diez días antes de la 26ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), destaca que el plástico representa el 85% de los residuos que llegan a los océanos y advierte que, para 2040, los volúmenes de este material que fluirán hacia el mar casi se triplicarán, con una cantidad anual de entre 23 y 37 millones de toneladas. Esto significa alrededor de 50 kg de plástico por metro de costa en todo el mundo (Jensen, 2021).

El 30 de enero de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró emergencia sanitaria por el virus SARS-CoV-2. Ante esto, surgió una gran cantidad y variedad de pruebas, antisépticos y equipo de protección personal que incluyen desde cubrebocas hasta overoles.

En el foro realizado por la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac) informó que en 2020 se consumieron al menos 6 millones 933 mil toneladas de resinas en México, de las cuales un millón 372 mil toneladas correspondieron a polipropileno (PP) y 1 millón 202 mil toneladas a polietileno a alta densidad (PEAD) (Ordaz, 2021).

En México se tiran al día poco más de 120 mil 128 ton/día, un total de 43 millones 846 mil 720 toneladas por año de desechos sólidos urbanos, donde desechos plásticos –casi 500 millones son botellas de polietilentereftalato (PET)– de los cuales se calcula que entre

15 y 20 por ciento provienen de habitantes de ciudades y el resto de actividades productivas que aumentaron durante la pandemia (ANUIES, 2021).

Con el incremento de la demanda en los dispositivos médicos y el empaquetamiento para combatir la covid-19, productos como los protectores para el rostro, los trajes de protección personal, los guantes de vinilo, bolsas desechables y mascarillas. En cuanto a la demanda de alimentos por entrega, se ha incrementado la demanda de polietileno de baja densidad, el polietileno de alta densidad, el polietilentereftalato y el poliestireno, que se emplean con materiales de embalaje (Arévalo, 2021). Como se observa en la figura 2 se puede visualizar la demanda de plásticos por segmento económico de plástico en la Unión Europea durante la pandemia en 2021.

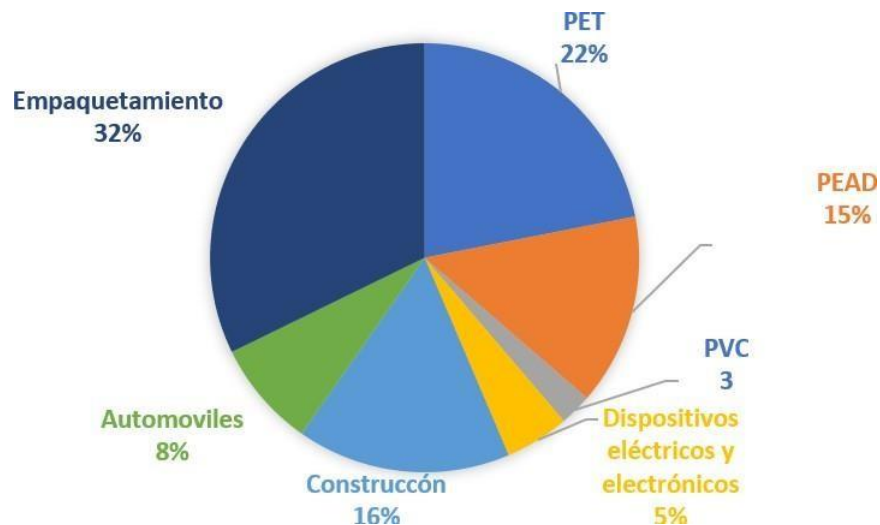


FIGURA 2: Uso de plástico en la Unión Europea durante la pandemia por COVID (Arévalo, 2021).

El polietileno es lo que más se recicla en México al representar el 51.2 por ciento del volumen total de materiales reciclados a nivel nacional, que es de 22 millones 449 mil 520.6 toneladas por año, según informes de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac).

En México la empresa ECOCE es una asociación civil ambiental, creada desde el 2002, por la industria de bebidas y alimentos, quien recupera y valoriza los residuos de envases y embalajes en pesos/kilogramo. Promueve y fomenta, gracias a sus asociados, el acopio masivo de envases con el fin de tomar una responsabilidad compartida y propiciar el desarrollo de una cultura ecológica entre los distintos actores. Hoy más de 30 empresas contribuyen con ECOCE para mantener y conservar nuestro ambiente. Separar los residuos que generamos es una actividad que nos permite recuperar materiales que representan recursos y energía (Anipac).

Como se observa en la figura 3 el polietileno es los materiales más utilizados para envases y empaques en México al representar el 18% por ciento del volumen total de materiales a nivel nacional, que es de 22 millones 449 mil 520.6 toneladas por año, según informes de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac).

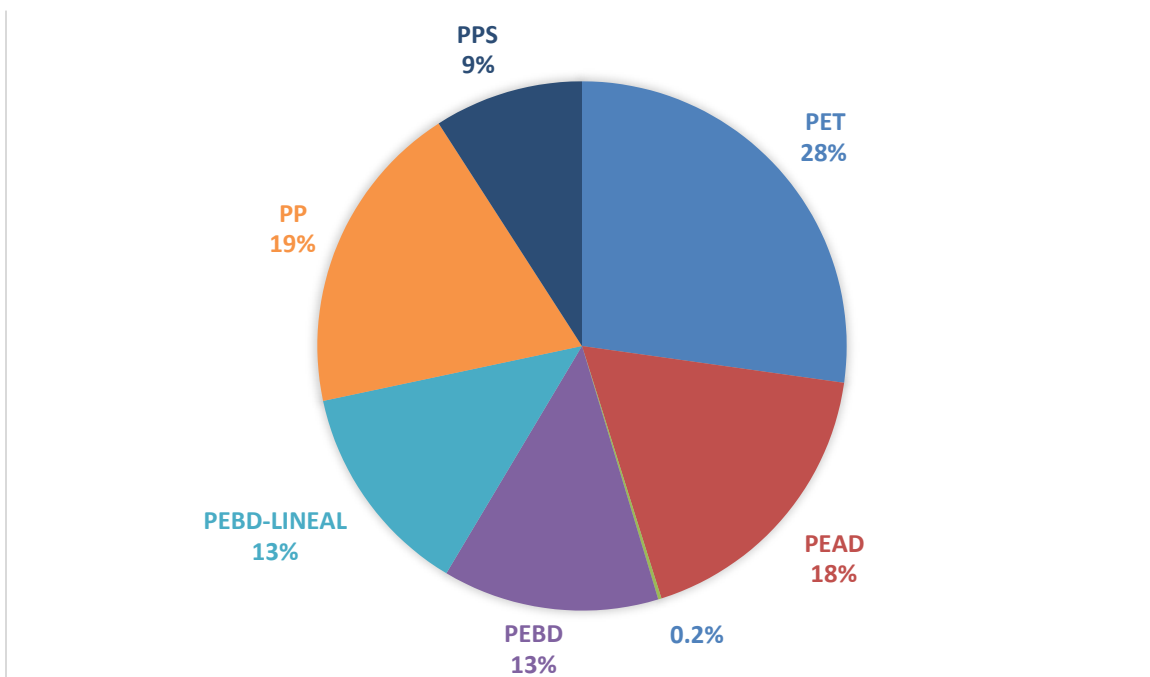


FIGURA 3: Plásticos usados para envases y empaques en México 2016 (ECOCE,

2017).

En la figura 4 se observa la generación de RSU en mayo del 2019, donde fue presentado el Plan de Acción Basura Cero, el cual funge como base para la política ambiental en materia de residuos en la Ciudad de México. Para estimar la generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México, la Secretaría de Obras y Servicios utiliza el indicador de máxima producción de residuos, de acuerdo a factores de generación y crecimiento poblacional y de servicios. De esta manera se estima la generación de residuos proveniente de casa-habitación, de comercios (mercados y establecimientos mercantiles), de servicios (centros de espectáculos y recreación, restaurantes y bares, servicios públicos, hoteles, oficinas públicas y centros educativos), los provenientes de la Central de Abasto (ceda) y otros residuos provenientes de fuentes diversas. La menor generación corresponde a los residuos controlados, los cuales son de manejo especial (unidades médicas, laboratorios, veterinarias, terminales terrestres, de transporte aéreos y centro de readaptación social) (Cintora, 2021).

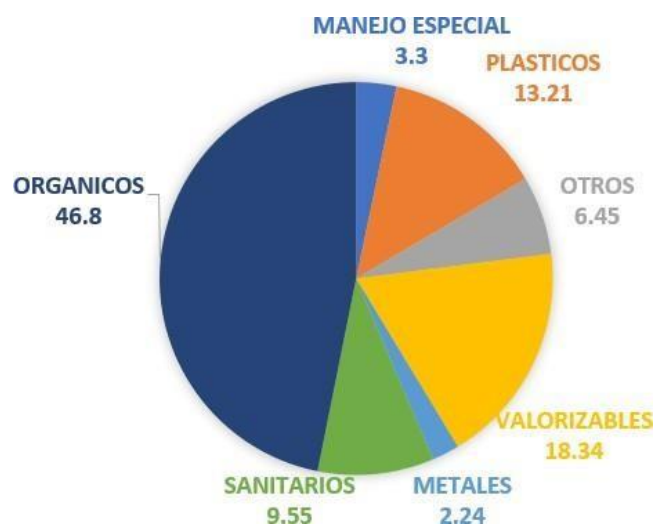


FIGURA 4: Composición de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de México (ECOCE, 2017).

México es considerado líder en el acopio y reciclaje de pet postconsumo, y cuenta con la planta de reciclado de pet grado alimenticio más grande del mundo (Plastics Technology México 2020); sin embargo, el reto presente radica en reducir el uso y consumo de materia virgen para la producción de estos envases, sustituyendo e incrementando el uso de material reciclado (Cintora, 2021).

Como parte de las medidas para promover el cuidado del medio ambiente, el Gobierno de la Ciudad de México firmó un convenio con Ecología y Compromiso Empresarial (Ecoce) A.C., a fin de aumentar al doble el reciclaje de diversos materiales como PET, polietileno de alta densidad, y vidrio, entre otros (ECOSE, 2019). La Jefa de Gobierno, Claudia Sheinbaum Pardo, aseguró que con estas acciones lo que se busca es que otros materiales reciclables, además del PET, tengan un valor mínimo para que entren nuevamente en un proceso de producción en la capital, lo que permitirá convertir a la Ciudad de México en un ejemplo a nivel nacional e internacional en reciclaje de residuos sólidos urbanos (ECOSE, 2019). En la figura 5 se puede observar la composición de Residuos solidos en la Ciudad de México.

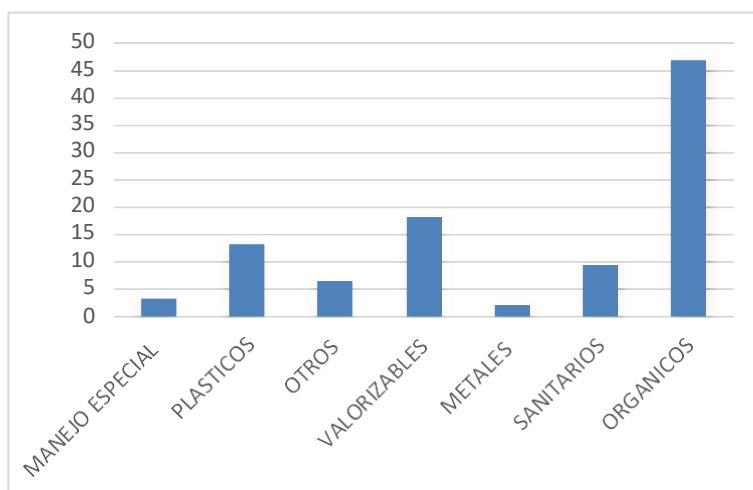


FIGURA 5: Composición de residuos plástico urbano (ECOSE, 2019).

Este nuevo proceso generará empleos mediante la economía circular, es decir, con el aprovechamiento de recursos para la reducción, reutilización y el reciclaje de los residuos sólidos. El proceso para que se revalorice el residuo, se involucrara la Sección 1 Gobierno de la Ciudad de México, así como con Asociaciones Civiles o personas que se dediquen al reciclaje (ECOSE, 2019).

El objetivo principal es que la Ciudad de México se reciclara el 90 por ciento del PET que se utiliza, y a nivel nacional el 56 por ciento. La meta es que al finalizar la presente administración capitalina únicamente se lleven a relleno sanitario 2 mil toneladas de las 8 mil 600 que actualmente se trasladan diariamente, de la basura que se produce en la Ciudad de México (ECOSE, 2019).

En 2021 en México se reciclaron un millón 913 mil toneladas de residuos plásticos, hecho que colocó al país como uno de los principales en materia de acciones de economía circular en América Latina, de acuerdo con datos de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac). El Estudio Cuantitativo de la Industria del Reciclaje de Plásticos en México que elabora la Anipac, indica que los principales materiales reciclados en el país son polietileno, cuya recuperación asciende a 51.2 por ciento (Alegría, 2022).

EMPRESAS DEDICADAS A LA RECUPERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS:

Plásticos Panamericanos: Se dedican a la fabricación de cajas y tarimas de plástico. Principalmente reciclan a partir de PEAD post-consumo.

Teknopellets: Reciclador de polietileno de Alta y Baja densidad postindustriales, post-comerciales y post-consumo a partir de los cuales produce pellets para la producción de películas plásticas y envases de PEAD con un contenido de material reciclado.

PLACOYT – Plásticos Comercializadora y Transformadora: Fabricante de bolsas plásticas a partir de PEBD reciclado.

Anguiplast - Fabricante e impresor de bolsas plásticas de polietileno de alta y baja densidad. En su proceso utilizan un porcentaje de material reciclado. Cuentan con 4 centros de acopio en la República de material post-consumo para integrarlo a su proceso de reciclaje.

ECOFORMADO: Reciclaje y transformación de plásticos y cartón laminado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Plantear un proceso para el reciclaje del polietileno para generar gases de síntesis.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Identificar los métodos de reciclaje del polietileno
- Determinar cuál será el proceso de reciclaje del polietileno
- Plantear el diseño de recuperación del Polietileno (HDPE).

ALCANCES

Este proyecto consiste en dar una alternativa para realizar un mejor manejo de los residuos sólidos urbanos de polietileno sin contaminantes, transformándolos en materia prima, recuperando de esta manera la mayor cantidad del material y así tener un mejor manejo de este material, obteniendo como resultado aceites combustibles.

La pirólisis de polietileno ofrece una recuperación de hasta 93.8% en peso de combustible (Ferrer, 1996) lo cual hace a la pirólisis una de las mejores opciones de recuperación de polietileno.

LIMITACIONES

El reciclaje es una de las medidas más importantes que existen para la recuperación de plástico y la disminución de acumulación de este material en rellenos sanitarios, basureros y el entorno en general.

El reciclaje empieza con la clasificación y separación de acuerdo con la categoría del

material. Uno de los grandes obstáculos para reciclar tiene que ver con que la composición de los residuos sólidos no es homogénea, los hábitos de consumo, separación y limpieza de materiales. Para una separación correcta nos podemos apoyar de los códigos de identificación de plásticos que se observan en la figura 6.

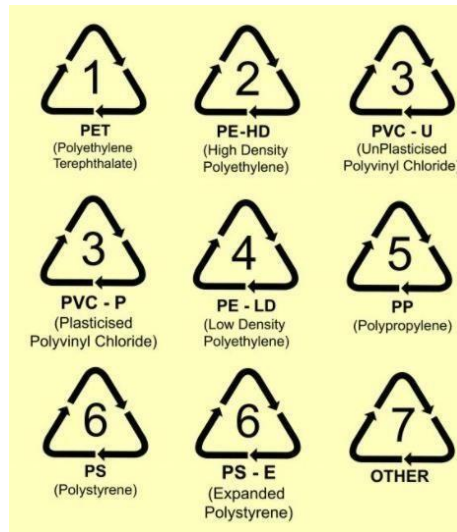


FIGURA 6: Códigos de identificación de envases (Martin, 2020)

La recolección del material debidamente clasificado puede ser recuperado, sin embargo, la recolección de residuos es mezclados por el servicio de recolección municipal. Es con esta acción donde realmente se convierte en basura, ya que al entrar en contacto con otros materiales se humedecen, ensucian y se contaminan con una gran variedad de sustancias diferentes, pasando a formar parte de un todo muy heterogéneo y compacto que conocemos e identificamos como basura.

Para la recolección se recurre a centros de acopia debido a la dificultad de su recopilación

ya que estos tienen una baja densidad. El grado de descomposición en que se encuentren y su combinación no uniforme.

También debe ser considerado que para la recuperación de polietileno por medio de pirólisis requiere de una inversión elevada debido a los altos costos de la tecnología requerida.

IMPACTOS ESPERADOS

En los informes de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac), reportaron que en 2019 el polietileno fue uno de los materiales que más se reciclaron en México, al representar el 51.2 por ciento del volumen total de materiales reciclados a nivel nacional, que es de un millón 913 mil 710 toneladas por año (Heredia, 2021). Se busca que el proyecto ayude a un aumento del porcentaje de polipropileno recuperado incentivando a las empresas a utilizar el método de pirólisis como medio de recuperación.

Con el reciclaje de plásticos se reducen las emisiones de CO_2 , ya que se evita la emisión de una cantidad equivalente a la generada durante la producción de plástico virgen. Así mismo al recuperar el material obteniendo gases de síntesis. Al no dejar que el material se descomponga al medio ambiente se reduce la emisión de CO_2 .

VIABILIDAD

Actualmente México ya se cuenta con iniciativas para crear un modelo de economía circular y mejoras en la gestión de los residuos, en 2019 se presentaron 38 iniciativas de ley promovidas por varios grupos parlamentarios para la prohibición de plásticos y

mejorar el manejo de los residuos (22 iniciativas presentadas por la Cámara de Senadores¹² y 16 iniciativas presentadas por la Cámara de Diputados¹³) (Andres Flores Montalvo, 2020).

Estas iniciativas ayudaran a que se tenga una mejor regulación en el manejo de residuos sólidos y se pueda tener una mayor cantidad de material recuperado. Esto representa la oportunidad de tener más materia prima pura para la recuperación química, alargando el tiempo de vida útil de los polímeros y reduciendo la huella de carbono.

El proyecto ofrece la alternativa de obtener gases de combustión por medio de la pirólisis de polietileno. La recuperación mecánica permitirá que no se tengan contaminantes que produzcan contaminantes como HCl o SO_2 .

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

TIPOS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Hay muchos tipos de residuos plásticos, los cuales podemos dividirlos en las siguientes cuatro categorías:

- Plásticos poco degradados y limpios. Una vez troceados pueden ser incorporados al proceso donde se originan.
- Plásticos poco degradados que han sido contaminados y no pueden ser incorporados al proceso de donde se originan, y han de ser procesados para diferente uso final o aplicación
- Mezclas de plásticos con composición conocida y esencialmente libre de contaminantes no poliméricos.
- Componentes de residuos sólidos urbanos que están contaminados con materiales no poliméricos.

Los residuos plásticos son generados en todas las etapas del ciclo de los plásticos, incluyendo el productor, el mezclador, fabricante, transformador, mayorista, envasador y consumidor. Del total de residuos generados, alrededor del 60 % es residuo post-consumo, principalmente productos de envasado. Los residuos de plásticos procedentes de la industria, los llamados “residuos industriales”, son alrededor del 17 % del total. El resto consiste en materiales de larga vida, como tuberías, piezas de automóviles, cables, juguetes, que entran finalmente en la categoría de desperdicios municipales (Torres Velazquez, 2019)

En la actualidad contamos con la existencia de tres clasificaciones de material plásticos los cuales son elastómeros, termoplásticos y los termoestables.

Termoplásticos: Se ablandan al ser sometidos a temperaturas altas, pero luego al enfriarse adquieren un endurecimiento, y estos son más del 80% de los plásticos existentes en el mercado (ARPET, 2017). Este tipo de plásticos componen el 85% de los plásticos consumidos. Algunos de ejemplos de estos son: polietileno, polipropileno, poliestireno, nylon entre otros.

Termoestables: Son plásticos que se endurecen mediante el proceso de fraguado y luego

de eso no pueden ser fundidos nuevamente ni moldeados, ocupan el 20% restante en el mercado (ARPET, 2017). Este tipo de polietilenos generalmente son más resistentes, algunos ejemplos de estos son: resina de poliéster, melanina formaldehído, bakelita, entre otros.

Elastómeros: Presentan estructuras más complejas que los termoplásticos, en las que las distintas cadenas de polímeros están unidas entre sí por medio de enlaces químicos, formando redes. Al calentarse no se funden, comienzan a descomponerse y se transforman en otras sustancias. Su reciclaje es, por tanto, similar al de los termoplásticos de ingeniería, pues únicamente se muelen o pulverizan para ser usados como cargas en matrices de otros polímeros.

Para clasificar los plásticos nos podemos apoyar de la tabla 1 donde se puede observar la codificación de símbolos empleados para su identificación, usos comunes, propiedades y facilidad de reciclaje.

TABLA 1.- Simbología de identificación para plásticos (Society of the Plastics Industry)

Símbolo	Polímero	Usos comunes	Propiedades	Posibilidad de reciclaje
	Polietileno tereftalato	Botellas plásticas (agua, bebidas gasificadas, aceite de cocina, etc.)	Ligero, transparente y resistente	Sí, ampliamente reciclado

	Polietileno de alta densidad	Botellas para productos de limpieza y desinfectantes	Rígido y resistente al fraccionamiento	Sí, ampliamente reciclado
	Policloruro de vinilo	Tubos de plástico, pisos de vinilo, aislamiento de cableado eléctrico	Puede ser rígido o ligero, usado en la construcción, cuidado de la salud y electrónica	Frecuentemente no reciclable debido a sus propiedades químicas
	Polietileno de baja densidad	Bolsas plásticas, envolturas de alimentos	Ligero, de bajo costo, versátil, frágil a la acción mecánica y térmica	Fácil de romper, hace difícil su reciclaje
	Polipropileno	Tapas de botellas, muebles, utensilios de cocina, automóviles, dispositivos	Dureza y resistencia, barrera efectiva contra el agua y agentes químicos	Frecuentemente no reciclable debido a sus propiedades químicas

		médicos, etc.		
	Poliestireno	Envases de comida para llevar, menaje de plástico, bandeja de huevos	Ligero, estructuralmente débiles, de fácil dispersión	Raramente reciclable
	Otros plásticos (acrílicos, policarbonatos, fibras polilácticas)	Botellas resistentes a la refrigeración, congelamiento, biberones, fibra de vidrio	Diverso en naturaleza y con varias propiedades	No se puede reciclar, riesgo de contaminación durante el reciclaje

Estos símbolos se desarrollaron en 1988 por la SPI (Society of the Plastics Industry) Identifican el tipo de plástico del recipiente o envase en que están incorporados.

Además de facilitar el reciclaje del mismo después de su utilización.

El símbolo está formado por el número que identifica el material rodeado de un triángulo de flechas sucesivas.

Este, se conoce como triángulo de Möbius, que es el símbolo internacional del reciclaje.

Representa sus tres fases: recogida de residuos, tratado de los mismos y vuelta al proceso productivo.

Los objetivos iniciales de esta simbología son los siguientes:

- Aportar un sistema coherente para facilitar el reciclado de los residuos plásticos.
- Ofrecer un medio apropiado para identificar el tipo de plástico con el que están fabricados los envases que se utilizan habitualmente.
- Codificar los seis tipos de resinas plásticas más comunes y un grupo adicional para las que no estén contenidas en ellos.

TIPOS DE POLIETILENO

Un polímero es una macromolécula formada por la unión de moléculas de menor tamaño que se conocen como monómeros. Un polímero es una macromolécula formada por la unión de moléculas de menor tamaño que se conocen como monómeros.

El polietileno tiene una gran variación de tipos dependiendo de su método de fabricación, por lo que es un polímero muy producido. La estructura del polietileno es $(-CH_2 - CH_2-)_n$. Este polímero es resultado de la polimerización del etileno.

Polietileno de alta densidad (HDPE):

El Polietileno de Alta Densidad, se utiliza para artículos de envasado o empaquetado, asegurando la protección de lo que van a contener. Se usa en bolsas para basura gruesas, de las que no permiten que los insectos las degraden. Además, para fabricar saleros de plástico, botellas de lavado o pizetas, algunos juguetes, muebles infantiles como sillas, mesas. Hay tuberías fabricadas con Polietileno de Alta Densidad.

Este producto resulta muy económico, aunque no es tan adecuado como el Cloruro de Polivinilo PVC, el material para tuberías por excelencia. El Polietileno de alta densidad ofrece una mejor resistencia al manejo, elasticidad, estabilidad y confiabilidad a la hora de transportar algún material (Ejemplos, 2021).

Polietileno de baja densidad (LDPE):

El Polietileno de Baja Densidad, con sus siglas en inglés LDPE: Low Density PolyEtilene, es la variante “delgada” del Polietileno. Viene en forma de una película, que se ha usado extensamente para fabricar envolturas plásticas, bolsas para supermercado, hule burbuja. Este tipo de Polietileno tiene una estructura frágil, por lo que ocurren incidentes como el desgarre de las bolsas al cargarlas con mucha mercancía. Es económico, pero, al estar presente en este tipo de bolsas, se utiliza demasiado y al desecharse no se degrada con facilidad. Implicaría décadas el que se descompusiera en materiales más sencillos, por lo que genera un terrible impacto ambiental de esta manera (Ejemplos, 2021).

Espuma de Polietileno:

La espuma de polietileno es un material ligero y acolchado que se usa con mucha frecuencia en el empaque de artículos que van a ser enviados por paquetería. Cuando se ha envuelto el artículo con papel periódico o canela, se procede a rodearlo con una lámina de espuma de Polietileno, que por su suavidad amortiguará todo impacto que se presente durante el transporte del artículo (Ejemplos, 2021).

POLIMERIZACIÓN DEL ETILENO PARA LA OBTENCIÓN DEL POLIETILENO

La polimerización del polietileno dependiendo de las variables de operación como son la temperatura T, presión P y el catalizador a utilizar. Se obtendrán diferentes tipos de polietileno con propiedades mecánicas y térmicas aceptables a las necesidades. Así se obtiene el polietileno de baja densidad (Torres Velazquez, 2019).

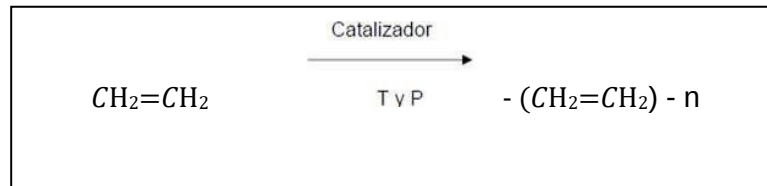


FIGURA 7: La ecuación general de la polimerización del etileno (Torres Velazquez, 2019).

ESTRUCTURA QUÍMICA

El etileno es un gas cuya fórmula molecular es $-CH_2-CH_2-$, el cual se produce industrialmente mediante el craqueo (cracking) del petróleo. Dependiendo de la estructura química de cada polietileno cambian sus propiedades físicas y mecánicas, por lo que podemos encontrarlos como líquidos, grasas, ceras, etc (Ferrer, 1996).

Como puede visualizarse en la figura 8, la estructura del polietileno es una cadena recta ramificada donde contiene grupos olefinicos de diversos tipos, estos grupos derivadores dependerán de los catalizadores utilizados en su fabricación o de las impurezas en el etileno (W.L., 1984).

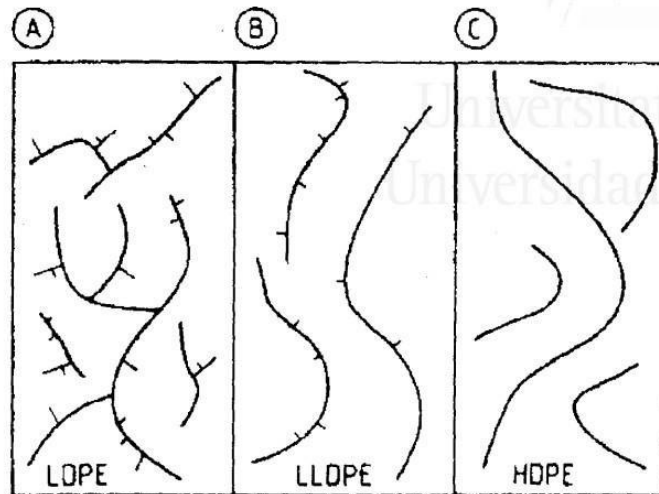


FIGURA 8: Esquema de las diferentes estructuras de polietilenos (W.L., 1984)

El LDPE tiene una estructura al azar de cadena larga, en las ramificaciones cortas no son uniformes en su longitud, pero son de tres o cuatro átomos de carbono de longitud (W.L., 1984).

El LLDPE tiene ramificaciones de longitud uniforme y están distribuidas a azar a lo largo de cada cadena (W.L., 1984).

El HDPE está exento de cadenas laterales, aunque con el uso de catalizadores puede añadirse algunas para cambiar propiedades (W.L., 1984).

El polietileno es un termoplástico cristalino que puede ser modificado con catalizadores dependiendo de las características que se quieran obtener.

PROPIEDADES FÍSICAS

La estructura física del polietileno es la cristalina y amorfa parcial del sólido, similar a la parafina sólida. Esta cristalinidad está relacionada con el grado de ramificación, misma que también afectara la dureza, la flexibilidad, índice de fluidez, resistencia al choque entre otros (Ferrer,1996). Es un sólido blanco translucido casi transparente, tenaz y flexible. Su temperatura de fusión es de 110 °C. su peso molecular es de 25 000 uma aproximadamente (Ferrer, 1996). En la tabla 2 se pueden visualizar las propiedades fisicoquímicas del polietileno.

TABLA 2: Propiedades de polietileno sólido (Juan Conesa, 1996).

Propiedades del polietileno	
Conductividad	7×10^{-4} cal*cm/cm ² °C
Punto de fusión	110°C
Densidad	20°C = 0.92 gr/cc 50°C = 0.90 gr/cc 80°C = 0.87 gr/cc 100°C = 0.81 gr/cc
Coeficiente de dilatación entre 0 y 40°C	2×10^{-4} (°C) ⁻¹
Índice de refacción	1.52
Viscosidad intrínseca	1.0
Comprensibilidad a 20°C a (atm) ⁻¹	5.5×10^{-4}
Calor especifico	20°C = 0.55 °C

	$50^{\circ}\text{C} = 0.7^{\circ}\text{C}$ $80^{\circ}\text{C} = 0.9^{\circ}\text{C}$
Aumento de volumen por calentamiento de 20 a 110°C	14

El polietileno tiene características que son independientes al peso, molecular de la molécula como la densidad, punto de fusión, calor específico, dureza... y otras que son dependientes del peso molecular como la resistencia a la atracción, la resistencia al choque, al desgarramiento y la flexibilidad a temperaturas bajas

PROPIEDADES QUÍMICAS

La oxidación térmica del polietileno importante por que fija los límites de usos, ya que limitan los cambios en la viscosidad, deterioro, resistencia mecánica, propiedades eléctricas, entre otras.

El proceso de oxidación es auto catalítico; aumenta la rapidez de la oxidación a medida que aumenta la cantidad de oxígeno absorbido, la velocidad de oxidación varia de una muestra a otra y es mayor cuando la ramificación de la cadena es grande y también si el contenido inicial de grupos que contienen oxigeno es grande (Juan Conesa, 1996).

APLICACIÓN INDUSTRIAL

El polietileno al ser un material tenaz, permeable, flexible, entre otras características; esto le permite tener una amplia aplicación industrial. Estos cables pueden ser cables de alta tensión, de comunicación utilizados en edificios, automóviles o aparatos electrodomésticos (Fink, 1981).

Las aplicaciones que se le pueden dar van desde materiales de construcción, aislantes eléctricos, empaque, tuberías, botellas, juguetes, cajas, bolsas, tanques para agua, pistas de patinaje, redes para pesca y chalecos antibalas. Esto no es más que una muestra de la versatilidad que posee este plástico (Girón, 2005).

El polipropileno también es utilizado por método de inyección para la obtención de tapas, taparrosas, envases para transporte y almacenamiento de alimentos congelados, productos farmacéuticos (Centro empresarial del plástico, 2019).

También se puede obtener por termoformado de empaques para galletas, chocolates y dulces.

Otras aplicaciones son películas de laminación. La lámina corrugada imita la estructura del cartón corrugado, con mejores cualidades y durabilidad (Centro empresarial del plástico, 2019). En la industria automotriz se utiliza principalmente en contenedores para aceite y gasolina, conexiones, tanques para agua, tubos y mangueras (Girón, 2005)

RECICLAJE

El reciclaje es el proceso por el cual se reutiliza una materia usada o en desuso, mediante un tratamiento físico, físico-químico y mecánico con el objetivo de alargar la vida útil de los materiales considerados basura, alargando el uso de ayudando a reducir la contaminación ambiental (MACAS, 2018).

En México, destaca, en consumo, el polipropileno (PP) con 1,102,000 ton/año, el polietileno de alta densidad (PEAD) con 836,000 ton/año, el polietileno de baja densidad (PEBD) con 545,000 ton/año, el polietileno lineal de baja densidad (PEBDL) con 455,000 ton/año, el polietileno tereftalato (PET) con 555,000 ton/año, el policloruro de vinilo (PVC) con 442,000 ton/año, y el poliestireno (PS) con 356,000 ton/año (Conde, 2013), aquí radica la importancia de un buen manejo de materiales que son consumidos y desechados, llegando a rellenos sanitarios sin un tratamiento correcto para su recuperación.

Como puede visualizarse en la figura 9, el residuo plástico representa el 13.21 % del total de residuos, para solucionar el problema de tratamiento de residuos sólidos existen diferentes leyes que ayudan a poder hacer el manejo correcto de los residuos sólidos. La ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, publicada en el Diario oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003 y que entró en vigor en enero de 2004, establece que, para una gestión integral de los residuos, se requiere el compromiso de responsabilidad compartida pero diferenciada de todos los sectores de la sociedad (PROFEPA, 2016).

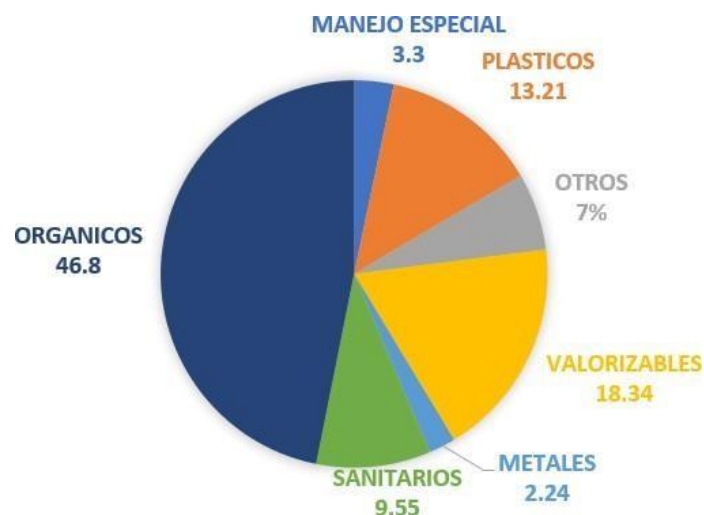


FIGURA 9: Porcentaje de plásticos en rellenos sanitarios (PGIR, 2021-2025).

La ley, clasifica y define los residuos y las responsabilidades de los tres órdenes de gobierno, así tenemos:

- Residuos peligrosos (RP): Son aquellos que posean algunas de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad; así como envases, recipiente, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio. Este tipo de residuos están bajo control federal (PROFEPA, 2016).
- Residuos de manejo especial (RME): Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. Son de responsabilidad estatal (PROFEPA, 2016).
- Residuos sólidos urbanos (RSU): Los generados en las casas habitación que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos. Son de responsabilidad municipal (PROFEPA, 2016).

MÉTODOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Existen varios métodos para la eliminación de residuos poliméricos municipales e

industriales, es decir, vertederos, incineración, reciclaje de materiales y recuperación química. El tratamiento adecuado de los residuos poliméricos es una de las preguntas clave de la gestión de residuos y es importante desde el punto de vista energético, medioambiental, económico y político (A. K. Panda, 2010). En la figura 10 se muestra el método de gestión de residuos.

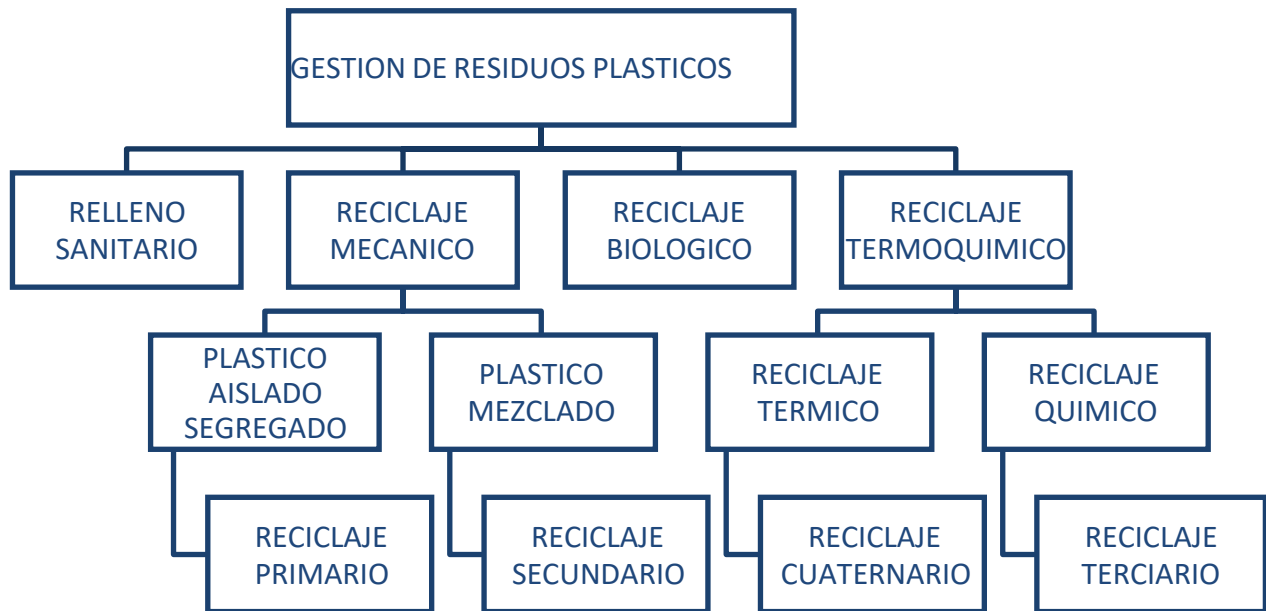


FIGURA 10: Métodos de disposición final (A. K. Panda, 2010).

Un relleno sanitario es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final (Territorial, 2005).

EL RECICLADO PRIMARIO:

Se refiere a la incorporación de los productos reciclados con otros similares, es la separación, limpieza y paletizado, los factores a considerar en el reciclado primario o secundario de residuos plásticos son (Laguna, 1992):

- Gran volumen de almacenamiento
- Composición no uniforme de los residuos
- Limpieza de los residuos
- Necesidad de separación de los diferentes polímeros
- Estado de degradación del material

RECICLAJE MECÁNICO O SECUNDARIO:

Es el proceso de recuperación de residuos sólidos poliméricos para la reutilización en la fabricación de productos de poliméricos a través de medios mecánicos (Miranda, 2018). Antes de la reprocesamiento real de materiales reciclados en nuevos productos, la conversión de residuos a nuevas materias primas debe ocurrir. Para los desechos sólidos poliméricos, este proceso puede incluir los siguientes pasos (Kim Ragaert, 2017).

Separación y clasificación: esto ocurre según la forma, densidad, tamaño, color o composición química.

Embalaje: si el polímero no se procesa donde se clasifica, a menudo se embala en el medio para fines de transporte.

Lavado: eliminación de contaminantes (a menudo orgánicos).

Molienda: Reducción de tamaño de productos a escamas u hojuelas.

Para el reciclaje secundario se convierte al plástico en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. Algunos ejemplos de plásticos recuperados por esta forma son los termoestables o plásticos contaminados. El proceso de mezclado de plásticos es representativo del reciclaje secundario. Este método elimina la necesidad de separar y limpiar y de esta forma la mezcla de plásticos (incluyendo tapas de aluminio, etiquetas de papel, polvo, etc.), se muelen y funden juntas dentro de un extrusor. Los plásticos pasan por un tubo con una gran abertura hacia un baño de agua y luego son cortados a varias longitudes dependiendo de las especificaciones del cliente. Los plásticos termoestables son partes que no se y que tienden a acumularse en el centro de la mezcla y los plásticos más viscosos tienden a salir, dándole al producto final una apariencia uniforme (Rezagos, 2020).

RECICLAJE BIOLÓGICO:

Es la biodegradación es un sistema de compost. Los desechos deben demostrar que son 'capaces de sufrir descomposición biológica en un sitio de compost como parte de un programa disponible, de modo que el polímero no sea visualmente distinguible y se descomponga en dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa, a una velocidad consistente con materiales compostables conocidos (J. H. Song, 2009).

Las vías bioquímicas utilizan microorganismos (bacterias y levaduras) para transformar los residuos plásticos, en condiciones de presión y temperaturas mucho más suaves que las vías termoquímicas (Torres Velazquez, 2019).

Sabemos que los plásticos en general no son biodegradables (PE, PS, PVC, PP...), pero hay algunos tipos de plásticos que pueden ser descompuestos. Se pueden considerar dos tipos de vías bioquímicas:

Proceso aerobio: consiste en la descomposición de las materias orgánicas mediante la acción de microorganismos que consumen grandes volúmenes de oxígeno y producen

cantidades considerables de calor. Como principales productos se obtienen humus, CO₂ y H₂O.

Proceso anaerobio: la acción de microorganismos, sin consumo de oxígeno y en condiciones reductoras, sobre la materia orgánica, produce un gas rico en metano. La biodegradación de los plásticos se ha convertido en un tema controversial, probablemente porque hasta hace algunos años la mayoría de los plásticos comerciales de gran volumen no eran biodegradables. Pero el concepto es suficientemente claro debido a que, bajo ciertas condiciones, los microorganismos consumen el polímero, reduciéndolo a compuestos gaseosos simples y naturales (Torres Velazquez, 2019).

EL RECICLAJE TERCIARIO O QUÍMICO:

También llamado reciclaje termoquímico o de materia prima, el reciclaje químico involucra mecanismos en los cuales los desechos poliméricos recolectados se degradan químicamente en sus monómeros u otros químicos básicos. Esto se refiere a la conversión de los residuos plásticos en productos químicos más simples, no poliméricos, tales como aceites, ceras, grasas, monómeros, oligómeros, gas de síntesis o energía. Actualmente, el reciclaje terciario cuenta con dos métodos principales: pirólisis y gasificación, no obstante, se están desarrollando otros métodos como la meta análisis y el glicólisis (Rezagos, 2020).

INCINERACIÓN O RECICLAJE CUATERNARIO:

Consiste en el calentamiento del plástico con el objeto de usar la energía térmica liberada de este proceso para llevar a cabo otros procedimientos, es decir, el plástico es utilizado como un combustible con el objetivo de reciclar energía.

La incineración puede incluirse en esta clasificación siempre que la recuperación de calor sea acompañada de un generador de vapor o por el uso directo de gases de humo de alta temperatura, en un proceso que requiera una fuente de calor externa. Estos gases de humo son para recalentar, secar o templar hornos. La incineración posee otras ventajas (Rezagos, 2020):

- Disminuye considerablemente la cantidad de espacio ocupado en los rellenos sanitarios.
- La recuperación de metales.
- El manejo de diferentes cantidades de desechos. Sin embargo, algunas de sus desventajas son: la generación de contaminantes gaseosos, aunque ésta es mínima, y la gran inversión monetaria que representa.

SEPARACIÓN

La forma más fácil y eficiente de separación de los plásticos es la separación en la fuente, es decir, la que realiza el usuario directamente al desechar sus residuos. Cuando esto se realiza, además de que la identificación puede realizarse fácilmente a través de los códigos, se evita que los plásticos se mezclen y se contaminen con otros materiales, facilitando todo el proceso posterior de reciclaje (Alethia Vázquez Morillas, 2016).

Esta separación puede realizarse tanto a nivel doméstico, separando envases de PET y PE, como a nivel industrial, mediante la separación de la película termo encogible y de otros materiales usados en el embalaje (Alethia Vázquez Morillas, 2016).

Una vez que los residuos plásticos han sido separados en la fuente, existen dos formas de recolectarlos. La primera es la recolección selectiva, es decir, un proceso en el que en distintos momentos se colectan diferentes materiales.

La segunda implica que el usuario lleve sus residuos a un punto de recolección, en

ocasiones recibiendo un pago por los mismos. En ambos casos se requiere tanto de la participación de los usuarios como de estructuras e instalaciones que le den soporte a todo el sistema. En el caso de los residuos de origen industrial, es posible que los recicladores, al adquirirlos, se responsabilicen de su recolección (Alethia Vázquez Morillas, 2016).

MÉTODOS DE SEPARACIÓN

Un punto importante durante el proceso de reciclado de los polímeros es la etapa de separación de los diversos componentes estructurales como pueden ser etiquetas, tapas, otras resinas en el caso de estructuras multicapas; o bien el efecto adicional que pueden aportar pigmentos y cargas, ya que si la materia prima está contaminada los productos de recuperación serán de menor calidad.

La primera forma de realizar la separación es la separación que el usuario directamente realiza al desechar sus residuos. Esta primera separación se puede realizar apoyándose de identificación puede realizarse fácilmente a través de los códigos, lo cual evita que los plásticos se mezclen y se contaminen con otros materiales, facilitando todo el proceso posterior de reciclaje. Esta separación puede realizarse tanto a nivel doméstico, separando envases de PET y PE, como a nivel industrial, mediante la separación de la película termo encogible y de otros materiales usados en el embalaje.

Ya realizada la primera separación existen dos formas de recolectarlos. La primera es la recolección selectiva, es decir, la recolección realizada por parte del gobierno. La segunda implica que el usuario lleve sus residuos a un punto de recolección, recibiendo un pago por la entrega del material. En ambos casos se requiere tanto de la participación de los usuarios como de la recolección correcta por parte del gobierno. En el caso de los residuos de origen industrial, es posible que los recicladores, al adquirirlos, se

responsabilicen de su recolección. se encuentren los residuos, mayor será el costo y la complejidad de la instalación. Desde el punto de económico estas plantas son atractivas sólo si permiten recuperar grandes volúmenes de materiales reciclables.

Por el contrario, cuando los plásticos se colectan mezclados entre sí, con otro tipo de materiales reciclables o con el resto de los residuos es necesario llevarlos a una planta de separación, ya que como hemos mencionado se contaminan y necesitan un tratamiento especial. Mientras más mezclados se encuentren los residuos, mayor será el costo y la complejidad de recuperación de materia prima. Desde el punto de económico estas plantas son viables sólo si permiten recuperar grandes volúmenes de materiales reciclables. Los métodos de separación son:

1.-Separación manual: es una técnica que se sigue aplicando en todo el mundo, incluso en plantas con alto nivel de automatización, debido a que el ser humano puede entrenarse para separar materiales específicos con una alta eficiencia. Su limitación es el volumen de materiales que pueden separarse, que estarán en función de la duración de las jornadas y el número de operarios (Heredia, 2021). En la figura 11 se observa cómo se realiza una separación manual.



FIGURA 11: Separación manual de residuos sólidos (Heredia, 2021).

2.- Separación por densidad: los distintos plásticos presentan una diferente densidad, y esto puede utilizarse para separarlos en un tanque que tenga un líquido con una densidad específica. Las poliolefinas (PE, PP), por ejemplo, flotan en agua, mientras que el PVC y el PET no.

Este método es muy eficiente y se usa para separar las botellas de PET de sus tapas de polipropileno. Su eficiencia puede aumentarse si se combina con un proceso mecánico, como ocurre en los hidrociclones.

Al aplicar los procesos de separación basados en la densidad debe ponerse atención en factores como el uso de cargas, pigmentos, forma, porosidad y tamaño de los residuos, pues podrían alterar la flotabilidad de los mismos (S.M. AL-Salem, 2013). En la tabla se pueden observar las densidades de los plásticos más comunes, con dicha información se puede basar para realizar un proceso de separación por densidad.

TABLA 3: Intervalos de densidades de plásticos comunes (Alvarez, 2009).

Densidades	
Polipropileno	0.85 – 0.92
LDPE	0.89 – 0.93
HDPE	0.94 – 0.98
ABS	1.04 – 1.06
PS	10.04 – 1.08
Ny6, Ny66	1.12 – 1.16
PMMA	1.16 – 1.2

PVC plastificado	1.2 – 1.25
PC	1.2 – 1.22
PET	1.38 – 1.41
PVC rígido	1.36 – 1.4

- Separación por medios ópticos: dado que distintos plásticos tienen estructuras químicas diferentes, es posible distinguirlos a través de sistemas que combinan la emisión de una señal que llega a los plásticos.

Un conjunto de sensores que registra la respuesta de los mismos y emite una señal a un control computarizado, y actuadores neumáticos o disparos de aire que se activan en respuesta a esa señal, para separar los plásticos.

Como se observa en la figura 12 con el sistema de separación por color Mistilinea 5000 LB/HR, las señales que se emiten generalmente son de ondas infrarrojas, UV o rayos X. Estos métodos son altamente eficientes, pueden manejar altos volúmenes y permiten separar plásticos que no se pueden distinguir fácilmente por otros métodos, como el PET y el PVC, o incluso distintos colores del mismo tipo de plástico (Holmes, 2014).

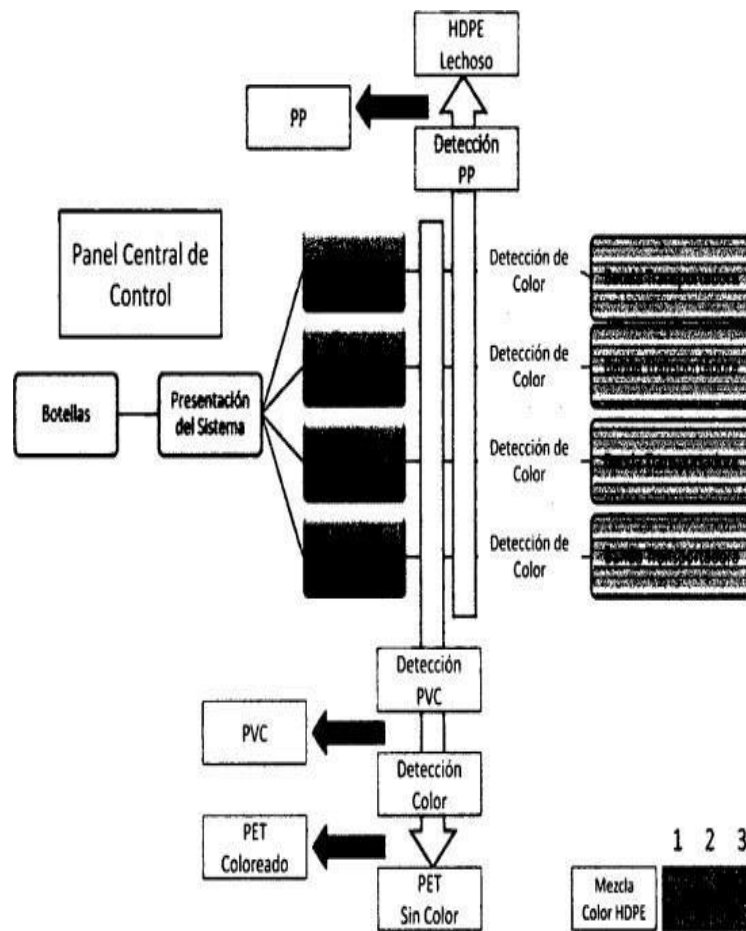


FIGURA 12: Sistema de separación por color Mistilinea 5000 LB/HR (Alvarez, 2009).

Separación Triboeléctrica: Los métodos de clasificación electrostática se basan en el hecho de que dos materiales diferentes no conductivos al ser frotados adquieren pequeñas cargas opuestas por transferencia de electrones.

El material con mayor constante dieléctrica se vuelve más positivo y el material con la constante dieléctrica es cargado negativamente. En la tabla 4 pueden observarse las constante dieléctrica de los plásticos más comunes, estas son afectadas por la adición de aditivos y cargas. La partícula del material con mayor constante dieléctrica es cargada positivamente contra la partícula con menor carga, esto es referido como carga triboeléctrica (Alvarez, 2009).

TABLA 4: Constantes dieléctricas de plásticos seleccionados a 1 MHz (Alvarez, 2009).

Tipo de plástico	Constante eléctrica
Polipropileno	2.2 – 2.6
Polietileno	2.3 – 2.4
Poliestireno	2.4 – 3.1
PVC rígido	2.7 – 3.1
PET	3.0
Nylon 66	3.4

En la figura 13 puede observarse como los materiales son separados al caer libremente en un campo eléctrico producido entre dos electrodos paralelos cargados opuestamente y separados de acuerdo a la carga triboeléctrica que poseen. Un problema presente es la dificultad para controlar la fuerza gravitacional que actúa durante la caída de las partículas. Por lo tanto, si las partículas son demasiado pequeñas o con poca carga, requerirá de una mayor área de separación entre los electrodos (Alvarez, 2009).

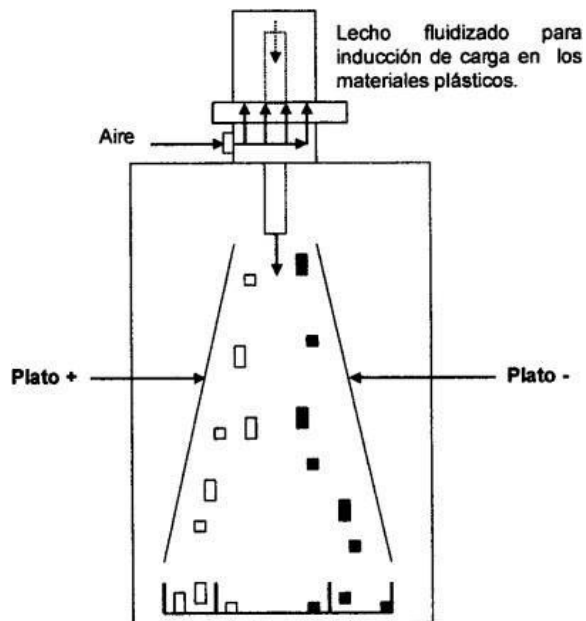


FIGURA 13: Equipo de separación triboeléctrico (Alvarez, 2009).

Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR): De acuerdo con consideraciones expuestas en el reporte de la APMIE Bruselas 1998, los métodos de espectroscópica infrarroja cercana (rango espectral de 700-2500nm) son los métodos de identificación más ampliamente utilizados para la clasificación automatizada de plásticos (Alvarez, 2009).

En la figura 14 se ejemplifica como se lleva a cabo el proceso de absorción; la variedad de enlaces químicos (O-H, N-H, y CH) absorben la luz en esta región y es bien conocido que un análisis de absorción NIR puede ser utilizado para obtener información de la estructura química de una muestra (Alvarez, 2009).

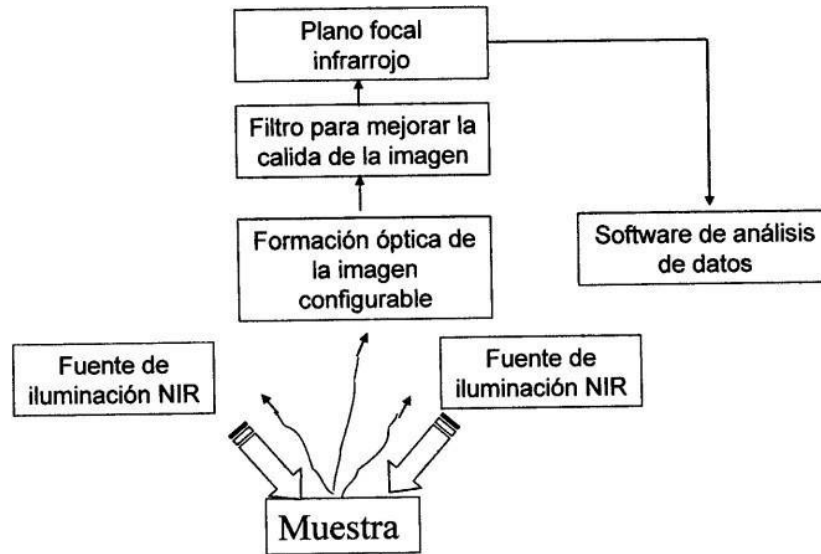


FIGURA 14: Esquema de un sistema NIR (Alvarez, 2009).

Las ventajas del NIR (D.A. Wahab, 2006):

- Las velocidades de escaneo permiten identificación del tipo de plástico Permite un múltiple chequeo para asegurar mayor exactitud
- Las velocidades de escaneo permiten mayor volumen de botellas plásticas separadas
- Etiquetas u otros tipos de obstrucciones no interfieren con la propia identificación de la resma
- Excepto para artículos oscuros, la lectura es independientes del color de la resma

PROCESO DE RECUPERACIÓN MECÁNICA

Entre los tipos de procesos de reciclado, el más extendido es el reciclaje mecánico, en el que el plástico se recupera a partir de un flujo de residuos y es convertido en gránulos o polvo.

Posteriormente se someten a clasificación, trituración y lavado para estar listos para su transformación en nuevos productos. Este tipo de reciclaje es la mejor opción desde la perspectiva ambiental si se compara con los otros tipos de reciclado, ya sean químicos, fisicoquímicos o de recuperación de energía.

La viabilidad técnica y económica del reciclado mecánico solo es posible si los plásticos a tratar son termoplásticos, homogéneos, libres de materiales contaminantes (S., 1999)

El proceso de reciclado mecánico comienza con la recolección y la clasificación como lo hemos visto con anterioridad, con los residuos seleccionados pasan a trituración o molienda. A continuación, el producto se lava y se separa la suciedad y las sustancias contaminantes, y posteriormente el material se centrifuga y se seca, almacenándose, realizándose una homogeneización que garantice la calidad del producto reciclado.

La trituración es un proceso de reducción de tamaño, esto con el fin de facilitar el transporte de los materiales, lavado, fundición, reacciones químicas y conformado del mismo. Esta reducción de tamaños se clasifica en dos grupos, el primero está definido como desintegración grosera que está constituida por trituración gruesa (15 cm), trituración mediana (3 a 15 cm) y trituración fina (3 a 0.5 cm) y el segundo grupo está definido como desintegración fina que está constituida por molienda grosera (0,1 - 0,3 mm) y molienda fina (menores de 0,1 mm), de aquí la diferencia entre los términos trituración y molienda (Hernández, 2013).

Actualmente se han diseñado equipos que realizan en una sola etapa el lavado y triturado del plástico, pero es conveniente llevar a cabo los procesos de lavado y triturado de forma separada, por ejemplo, la empresa MACCAD desarrolló una trituradora con ciertas

características para moler 275 kg/hr de plástico, la tolva está diseñada para eliminar el ruido que se ocasiona en la molienda, también contiene una criba que permite pasar las hojuelas de plástico con dimensiones de $2\frac{1}{4}$ o $\frac{3}{4}$ según los criterios que se requieran (José Emmanuel Medina García, 2011)

La molienda del Polietileno de Tereftalato (PET) se realiza dentro de un molino, en la figura 15 se puede observar el juego de cuchillas giratorias, las cuales tienen como función triturar las botellas hasta convertirlas en hojuelas con dimensiones específicas, dichas cuchillas están unidas a unos porta cuchillas; los porta cuchillas están unidos a un eje rotatorio por medio de cuñas colocado sobre un par de chumaceras; en un extremo del eje está acoplado un volante de inercia, el cual tiene como función almacenar energía para moderar las fluctuaciones de la velocidad a la que gira el eje cuando se esté triturando el PET, y por el otro extremo del eje está unida una polea que es parte del sistema de transmisión de potencia (José Emmanuel Medina García, 2011).

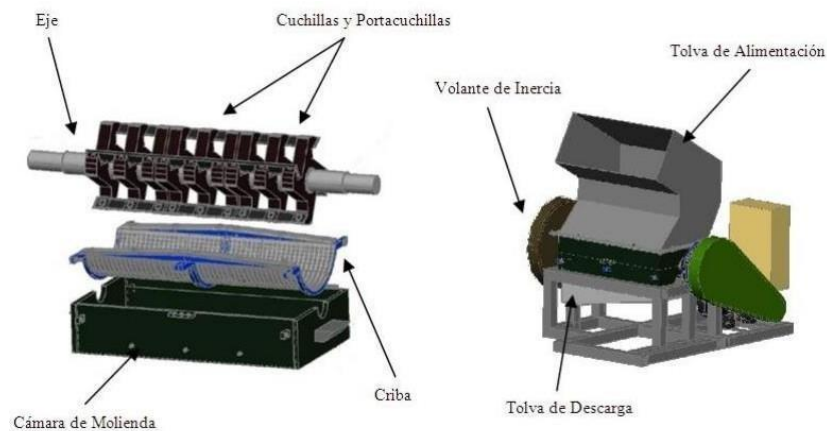


FIGURA 15: Componentes de la trituradora (José Emmanuel Medina García, 2011)

El molino está constituido por una tolva en la parte superior, la cual posicionará el PET directamente al sistema de trituración. Para obtener las dimensiones exactas de las hojuelas de PET es necesario incluir al sistema una criba; la criba es un componente fundamental para la trituradora porque ésta es la que determina las dimensiones de las

hojuelas que resultarán del proceso de molienda.

El método más común de pulverización se realiza utilizando molinos de desgaste de alta velocidad que muelen gránulos de aproximadamente 3/16–1/4 de pulgada (5–6 mm) de diámetro hasta la distribución de tamaño de partícula requerida. Un molino de desgaste utiliza un disco fijo y uno giratorio con una serie de dientes dentados radialmente mecanizados dentro de una carcasa del molino. Los discos se colocan uno frente al otro con un espacio estrecho que se estrecha hacia abajo desde el centro de las placas hasta el borde exterior. Los molinos modernos utilizan la operación horizontal para una producción de polvo más uniforme y un menor desgaste de los dientes de corte. Las unidades de producción utilizan configuraciones de molino simple, doble y triple de acuerdo con el rendimiento requerido. Hay una serie de parámetros importantes que se utilizan para controlar el rendimiento y la calidad de los polvos producidos en los molinos típicos, incluido el número de dientes en las placas de molienda, el tamaño del espacio entre las placas y la temperatura de molienda (Mexpolimeros, 2011).

SISTEMA DE LAVADO

Para el reciclado mecánico del polietileno, después de la molienda se requiere un lavado y secado. Estos son los pasos principales de los cuales se parte y se hace más complejo el proceso de reciclado, esto dependiendo que calidad de producto se requiere obtener. El contar con un sistema de recolección y clasificación eficiente nos daría la oportunidad de evitar una producción de contaminantes o materia prima de baja calidad.

Uno de los métodos de eliminación de contaminantes es la flotación. Este método elimina las etiquetas, adhesivos o los residuos de producto en las hojuelas de HDPE utilizando las diferencias de densidades que existen entre los polímeros (Prieto M. A., 2021). Existe en el mercado una gran diversidad de sistemas y configuraciones de lavado que se adaptan a las especificaciones de cada proceso para cumplir con los

requisitos de calidad de uso final para el HDPE reciclado.

Para la construcción de este sistema de lavado se necesita el diseño de las siguientes partes (Oscar Chapa Cordova, 2001):

- Aspersores de agua
- Bomba de agua
- Conductos de agua
- Filtros de agua
- Sistema de escurrido
- Reservorios de agua
- Selección de aspersores

Los aspersores de agua que se utilizaran para el equipo son de la marca Rain Bird de cono lleno, los tipos de aspersores de cono lleno presentan la siguiente forma de chorro.

Los aspersores seleccionados son los tipos 15F (José Emmanuel Medina García, 2011).

LAVADO

Una lavadora por centrifugación con aletas es una máquina para lavar plástico por centrifugación. En la figura 16 se observa el exterior de un contenedor de aletas rotatorias en el cual lo que hace es el movimiento del material dentro de esta canastilla (Daza, 2019).

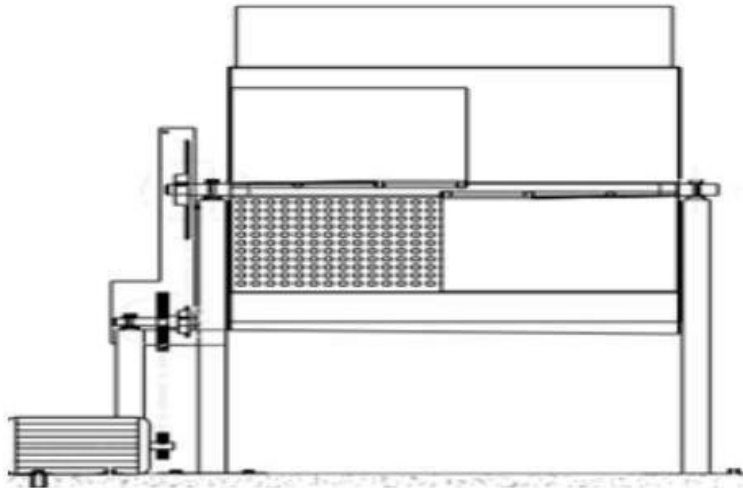


FIGURA 16: Lavadora con aletas (Daza, 2019).

Con una unión con aspas donde se genera su movimiento es por medio de un motor, con una relación de transmisión por rodamientos y una flauta la cual ingresa el agua, este tambor lo soporta un eje tambor horizontal. Se puede encontrar varios tipos de lavado como la agitación, centrifugación, ciclón. (Daza, 2019).

Sistema de escurrido

El producto que se obtiene del equipo luego de realizar un ciclo de trabajo son las escamas de plástico más el agua del lavado por lo que se hace necesario el diseño de un sistema de escurrido para el plástico antes de ser recolectado. El sistema de escurrido se encargará de la separación del flujo del agua de lavado de las escamas de PET, luego el agua pasa por un filtro antes de retornar al reservorio; este sistema estará formado de las siguientes partes (José Emmanuel Medina García, 2011):

- Malla transportadora
- Sistema motriz de la malla transportadora
- Depósito de recolección de agua
- Filtro de agua

SECADO

Los secadores mecánicos (centrífugas) y los secadores de aire caliente crean recortes adecuados para la extrusión. Los folios, fibras y espumas lavadas se pueden secar con un aglomerado y se procesa para obtener un material a granel esparcible de alta densidad. En este proceso se disminuye la humedad del material después del procesamiento de lavado del plástico. Se encuentran varios tipos de secado como (aire caliente, aire seco, aire comprimido, vacío, centrifugación) (Daza, 2019).

Dentro del proceso se separa en húmedo o en seco los plásticos mezclados y los materiales compuestos con agua pura (densidad =1) o agua modificada (densidad >1), en la corriente de aire, mediante imanes, separadores de alta frecuencia, máquinas de tamizado y clasificadores (Daza, 2019). En la figura 17 se observan las diferentes partes de una secadora, 1.- espiral, 2.- silo de almacenamiento, 3.- caldera y 4.- motorreductor donde es llevado a cabo el proceso de secado.

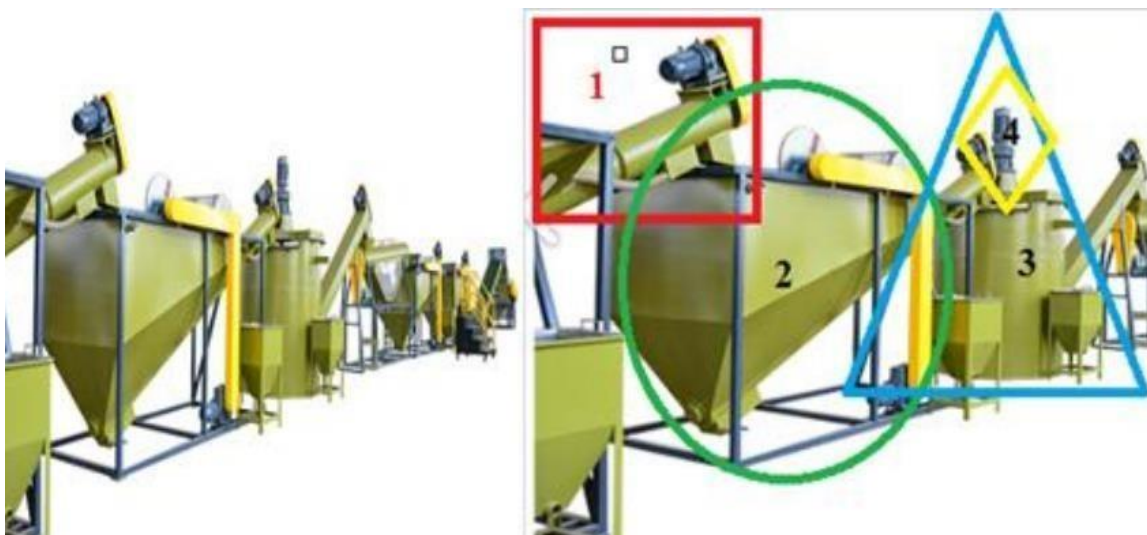


FIGURA 17: Partes de una secadora (Daza, 2019).

SECADOR POR VACÍO

Utilizado en materiales sensibles al calor. Con la capacidad para poder cristalizarse, como beneficio es que tienen un tiempo de ciclo corto para secado y consta de tres secciones (Daza, 2019):

- Tolva de calefacción: la tolva es una manta de calefacción de goma que como función es recibir el calor, contiene un soplador centrífugo con un calefactor que entra en una tubería el vapor hacia el material a una cierta temperatura configurado por medio de un panel de control.
- Vaso de vacío: Contiene un generador Venturi. Pasa de líquido a un estado gaseoso (vapor) lo cual reduciría la humedad que se encuentra en el material generado constantemente por la membrana del secador de aire.
- Retención o tolva: tiene una membrana que lo conlleva el secador lo que hace es purgar pasándolo al vaso presurizado y se lleva a cabo en una tolva como se muestra en la figura 18.



FIGURA 18: Retención (Daza, 2019).

SECADOR POR AIRE SECO

Es la absorción de humedad por medio de un tamiz molecular. Es un material con agujeros pequeños de tamaño uniforme, aunque estos tamices son más utilizados en la industria del petróleo para secar corrientes de gas (Daza, 2019).

En el caso del plástico tiene como desventaja, si la temperatura del secado es muy alta puede generar una difusión del plástico con el tamiz molecular y generar daños. Durante este proceso el material fluye lentamente en dirección opuesta al flujo de aire seco pasando por medio de una tolva para después salir a una base (Daza, 2019). En la figura 19 se muestra un secador por aire seco como los que se han mencionado con anterioridad.



FIGURA 19: Secador por aire seco (industry, 2017).

SECADO POR CENTRIFUGACIÓN DE PLÁSTICO

Este tipo de secado consiste en un tambor rotatorio como se muestra en la figura 20. En este se introduce el material a secar donde el producto se mezcla constantemente por medio del movimiento giratorio del tambor esto produce una fuerza centrífuga, el material se acelera contra la superficie del tambor, lo transporta de abajo hacia arriba por medio de unas paletas, esto lo que hace es eliminar la mayoría de la humedad que se encuentra en el material PET triturado. Permite un ahorro de energía, produciría un rendimiento en cuestión de minutos y no sea por horas (Daza, 2019).



FIGURA 20: Secador centrífugo (plástico, 2018).

Existen secadores centrífugos y secadores de aire caliente en muchos tamaños de construcción para obtener materiales con una humedad residual de 2 o 1% o aún más secos. Secando todo tipo de escamas, material molturado de botellas, otros plásticos duros, láminas, fibras, cintas y espuma (Daza, 2019).

En caso requerido, las plantas de separación y lavado incluyen un eliminador de etiquetas, el lavado en seco y un clasificador por gravedad. Suministramos el circuito de agua deseado para reducir el consumo de agua fresca y una ultrafiltración en el lavado caliente para ahorrar agua y energía (Daza, 2019). En la figura 21 se muestra un esquema general de un sistema de multidisciplinario de secado.



FIGURA 21: Partes de una secadora, máquina de secado, soplador y serpentín de tubo.(plástico, 2018).

PROCESOS DE RECUPERACIÓN QUÍMICA

Los procesos de reciclado terciario, es aquel donde se necesita tecnología avanzada para obtener moléculas más pequeñas, usualmente líquidos o gases, que son usadas como materia prima en nuevos procesos petroquímicos y plásticos. Los productos que se generan en el reciclado químico han sido utilizados y probados, dando muy buenos resultados como combustibles.

La tecnología del reciclado químico es la despolimerización, la cual puede generar una industria rentable y sustentable, dando como resultado altas cantidades de producto con poco desecho plástico.

TERMÓLISIS

Adicional a la combustión existe el método termoquímico; este reciclado consiste en descomponer a través de un proceso químico los residuos plásticos en componentes más sencillos, como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos (Vargas, 1994). Por sus características, es viable su aplicación tanto a mezclas de distintos polímeros como a polímeros termoestables, por lo que es un complemento adecuado al reciclado mecánico (Santillan, 2019). En la figura 22 se muestran cómo puede clasificarse los procesos de recuperación químico y sus derivados.

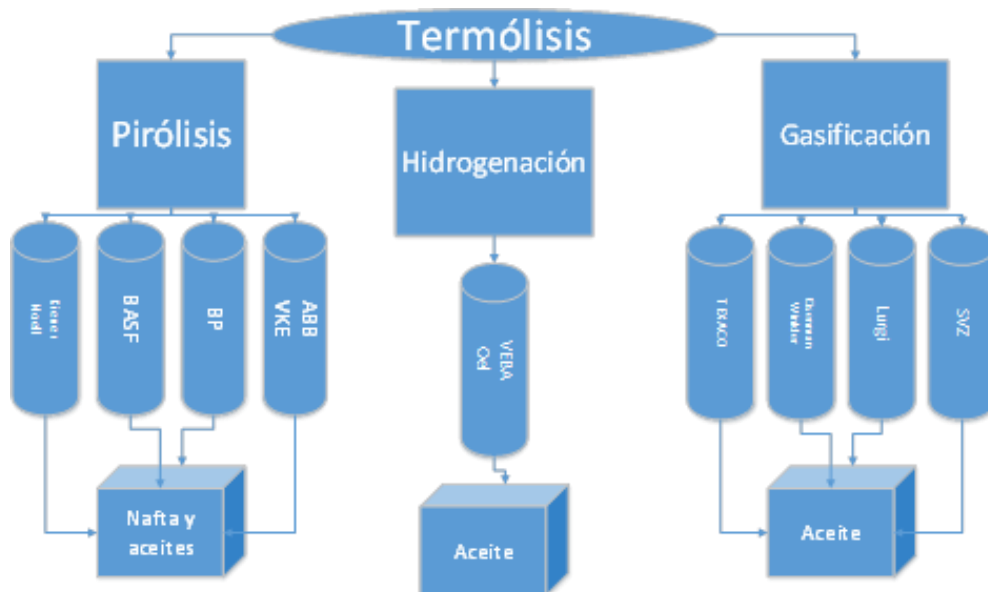


FIGURA 22: Tratamiento térmico de plásticos (Mastellone, 1999)

Como se ve en la imagen la termólisis es el tratamiento de los plásticos de desecho en presencia de calor a temperaturas controladas. Los procesos de termólisis pueden dividirse en termoquímicos avanzados como pirólisis (desintegración térmica en atmósfera inerte), gasificación (en presencia sub estequiométrica de aire, generalmente conduce a CO y producción de H_2), e hidrogenación o hidro-desintegración.

GASIFICACIÓN

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas que se produce en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados (Energía, 2007).

En este proceso se usa aire como agente gasificante, lo que proporciona muchas ventajas. La principal es no usar O_2 , lo que simplifica el proceso reduciendo el costo; la desventaja es la presencia de N_2 (inerte) en el aire que causa reducción en el valor calorífico de los combustibles producidos, debido al efecto de dilución en los gases combustibles al final del proceso. Otro agente gasificante es el vapor de agua, que se puede introducir en relación estequiométrica respecto al H_2 , evitando la presencia de N_2 . Varios tipos de procesos de gasificación han sido desarrollados y reportados ampliamente.

El principal reto es que durante la gasificación se producen cantidades significativas de carbón, el cual requiere ser procesado y/o quemado. Otros esquemas de gasificación, principalmente a escala piloto, usan gran cantidad de oxígeno, encareciendo el proceso; mientras que otros requieren cantidades considerables de materiales caros como coque y piedra caliza, y depositan mucho lodo de metales difíciles de separar. Un proceso de gasificación ideal para los plásticos como el polietileno debe producir gas de alto poder

calorífico, y no dejar residuos de carbón. Los primeros intentos de gasificación tomando en cuenta los plásticos, fueron publicados desde los 1970s (Hasegawa, 1974).

Los desafíos técnicos y económicos de los proyectos de gasificación incluyen el incumplimiento de la producción energética estimada, de la generación de ingresos y de los objetivos de emisión. En la figura 23 se explica un diagrama del proceso general del proceso de gasificación, donde se visualiza la entrada de materia prima, desechos que genera y proceso necesario para la obtención de gas combustible.

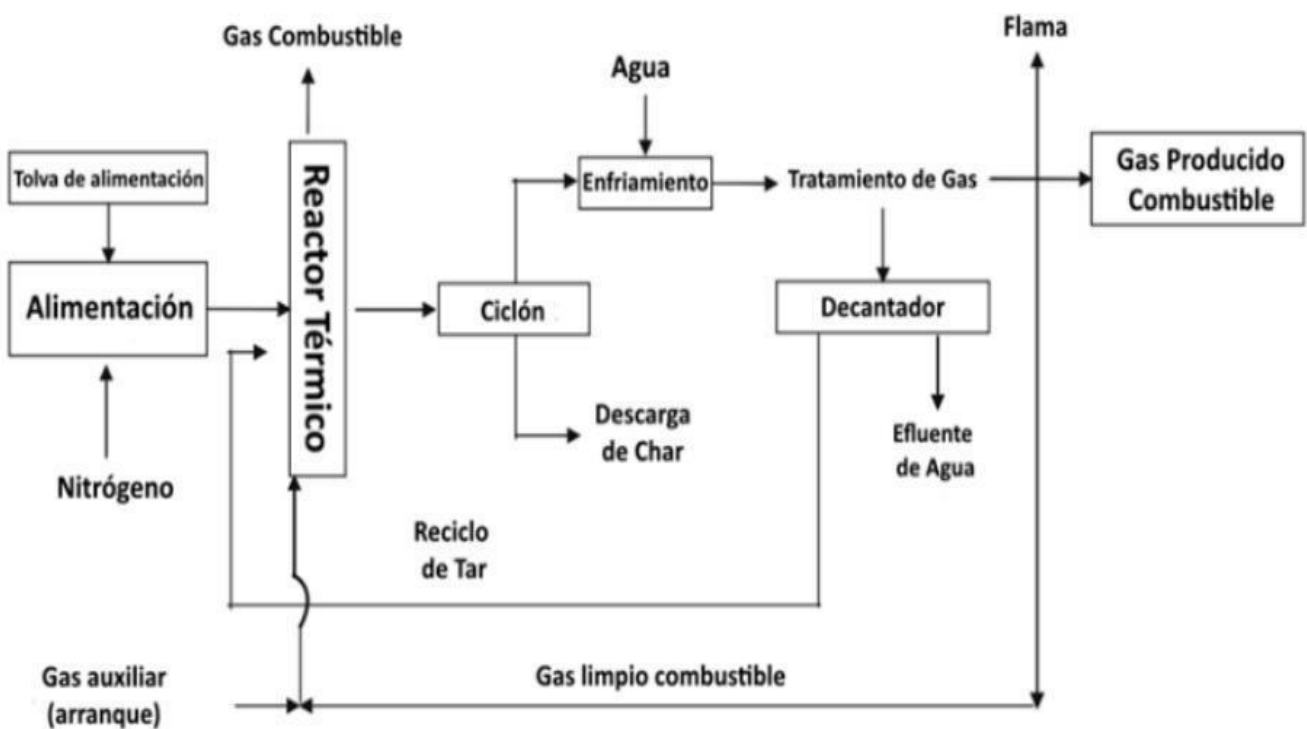


FIGURA 23: Esquema de proceso de gasificación (VARGAS-SANTILLÁN, 2019).

En la figura 24 se explica de una manera general el proceso el proceso de gasificación de residuos plásticos el cual se lleva a cabo en rango de trabajo tiene que ser entre 700 °C a 800°C, generando emisiones contaminantes y gas de síntesis, esto debido a que mayores temperaturas se da la formación de cenizas, provocando daños técnicos a los equipos (Barajas, 2014).

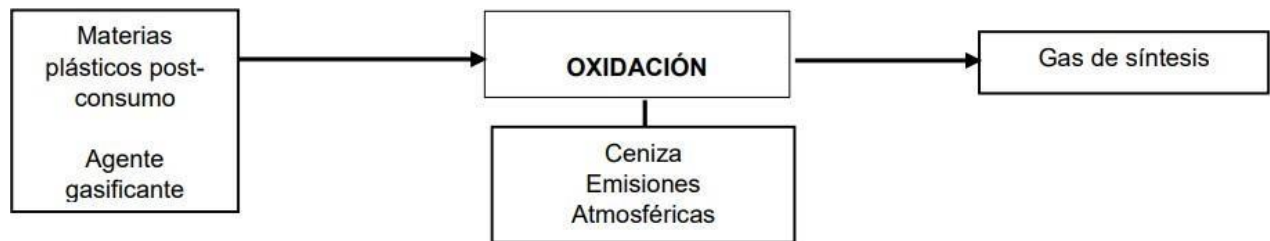


FIGURA 24: Proceso de gasificación (Saltos, 2013)

HIDRÓLISIS

Se establece como una reacción química donde el agua sirve como agente para romper los enlaces moleculares de una sustancia definida, dentro de la rama de la biotecnología y considerando a todos los seres vivos estas sustancias que se degradan por lo general son polímeros. En términos generales se refiere al proceso de desarticular moléculas gracias al uso del agua (Castillo, 2018).

Hidrólisis acida

Para este tipo de hidrolisis lo común es el uso de disoluciones con ácidos minerales como el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico a elevadas concentraciones y en temperaturas inferiores a los 100°C, de dicha manera se logra romper los enlaces de las sustancias mencionadas y en tiempos de aproximadamente 5 días (Ramirez, Navarro, & Acevedo, 2010) (Ramirez, 2019).

Hidrólisis alcalina

Proceso químico en donde se emplea sustancias álcali y que posterior son llevadas a altas temperaturas y a presiones considerables, mismas que una vez disuelta la sustancia ayuda a la desintegración del material (Castaño, 2018). Se suele emplear soluciones de 4-20% en peso de NaOH, en tiempos de 2 a 5 horas con un rendimiento del 98%.

Hidrólisis neutra

Se lleva a cabo mediante el uso de agua o vapor de agua, para presiones entre los 1-4 MPa en temperaturas de 200 – 300 °C, al contrario del proceso acido o alcalino esta metodóloga evita corrosión, sales inorgánicas y desechos acuosos de las neutralizaciones posteriores (Bertolotti, 2005)

QUIMIÓLISIS

Consiste en la descomposición del polímero mediante una reacción reversible, implicando ciertos agentes químicos, que conduce de nuevo a los monómeros de partida. Estos monómeros son idénticos a los utilizados en la preparación de polímeros vírgenes, por lo tanto, se espera que tanto los monómeros como los plásticos obtenidos a partir de la despolimerización tengan propiedades y calidad similares. La metodología de despolimerización química es la más establecida entre los métodos de reciclado químico. La principal reacción de despolimerización a nivel comercial es la de los poliésteres, principalmente el PET (Prieto M. A., 2020).

La figura 25 muestra los tipos de despolimerización, donde las principales desventajas de la despolimerización química es que está se puede llevar a cabo solo con polímeros de condensación tales como poliésteres, poliamidas, poli acetales, policarbonatos, etc., y no sirve para la descomposición de la mayoría de los polímeros de adición, que conforman los principales productos del sector del empaque, como las poliolefinas y el poliestireno (Prieto M. A., 2020).

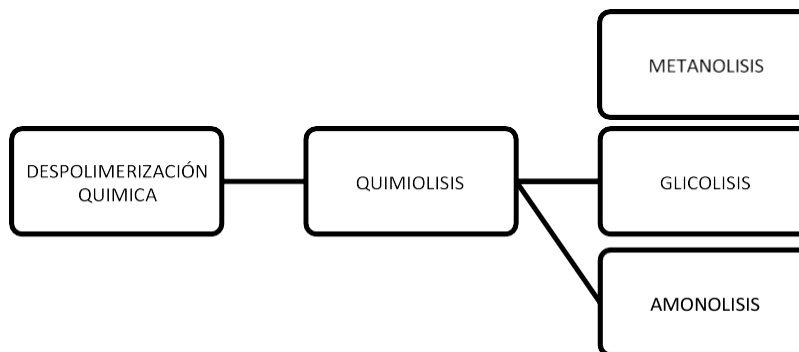


FIGURA 25: Esquema de despolimerización química (Prieto M. A., 2020).

METANÓLISIS

La metanólisis es un proceso que se lleva a cabo por medio de un tratamiento del polímero en altas cantidades de metanol en presencia de un catalizador como el trisopropóxido de aluminio o el acetato de zinc y sales de ácido arisulfúrico. En la figura 26 se muestra el proceso general donde se explica la metodología de degradación del PET, por medio de la adición de metanol a temperaturas (180-280°C) y presiones elevadas. Los productos principales son el dimetil tereftalato (DMT).

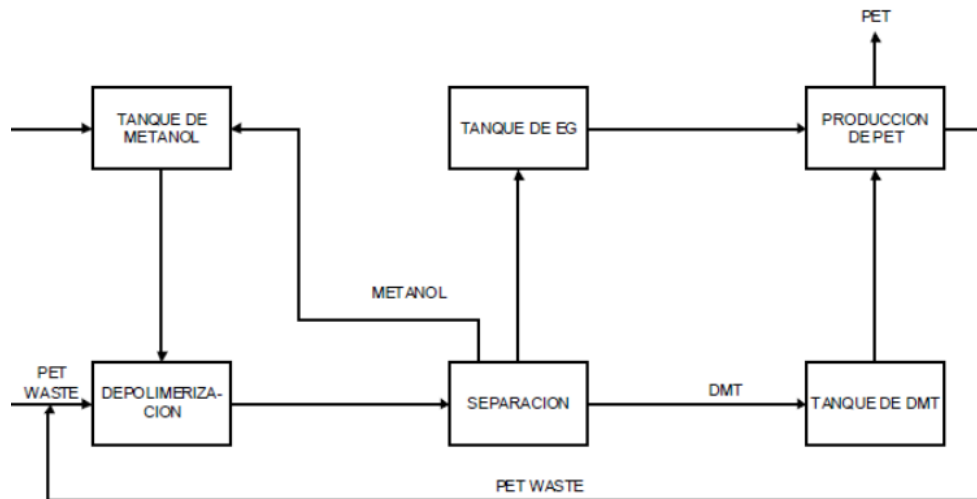


FIGURA 26: Diagrama de bloques de metanólisis (Carlos, 2004).

Este proceso se lleva a cabo bajo una temperatura de 160-240 °C bajo una presión de 20-70 atmósferas, de 3 a 4 horas. Hoechst Celanese utiliza este proceso para despolimerizar el PET posteriormente re polimerizarlo y utilizarlo en aplicaciones en contacto con alimentos.

GLICÓLISIS

El glicólisis es una reacción de condensación inversa, la cual utiliza EG en exceso, provocando degradación, obteniendo oligómeros de cadena corta (BHET), ambos son materias primas con mucho valor en la preparación de resinas insaturadas de poliéster, poliuretanos (especialmente espumas rígidas) y PBT (Karla Ivonne Zamudio Lara, 2013)

METODO 1

Esta reacción es catalizada por acetatos de Zn, Mn, Co, Pb, en presencia de carbonato de sodio y sulfato de potasio, se utilizan presiones normales o altas, y temperaturas de entre 80-250°C, usualmente se lleva un tiempo de entre 3 a 8 horas, esto va a depender de la cantidad de reactivos utilizados y las condiciones de temperatura y presión, las proporciones por peso de EG/PET varían de 2:1 hasta 4:1, se puede llegar a utilizar una purga continua de nitrógeno para inhibir la degradación de los polioles resultantes (Karla Ivonne Zamudio Lara, 2013).

Cabe mencionar que las materias primas obtenidas en el proceso no sirven para volver a polimerizar el PET, sino se produce una mezcla de oligómeros, los cuales presentan un beneficio económico para la fabricación de poliésteres insaturados, estos poliésteres son líquidos viscosos, que pueden entrecruzar sus cadenas con la adición de un monómero vinílico, y obtener un producto sólido termoestable (Mariano, 2011).

METODO 2

En la figura 27 se explica el proceso de glicólisis, desde el proceso de molienda, proceso de glicólisis y sus productos a obtener en este método. No se tienen muchas variantes al método anterior, sólo se modifican algunos parámetros de temperatura y tiempos de reacción, este método prescinde del carbonato de sodio y el sulfato de potasio (Karla Ivonne Zamudio Lara, 2013).

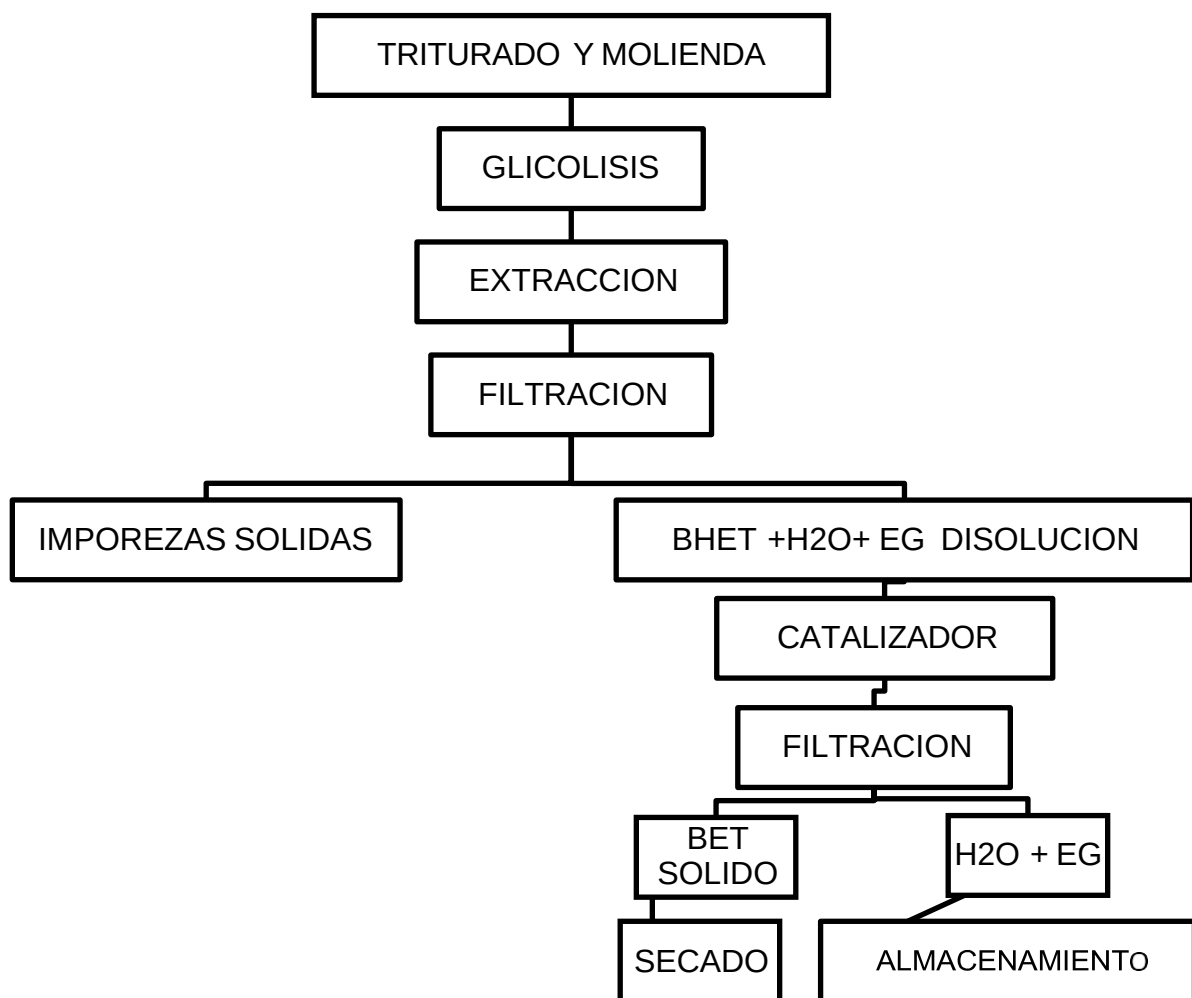


FIGURA 27: Diagrama de bloques del método de Glicólisis (Mariano, 2011).

Después de pasar por el reciclado mecánico, y teniéndose las escamas, estas últimas son puestas con EG y acetato de Zinc como catalizador, a temperaturas de entre 195 y 220°C, a presiones normales. Se utiliza una proporción de EG:PET de 6:1 y una relación de catalizador/PET de 1% con un tiempo de 3 horas (Karla Ivonne Zamudio Lara, 2013).

Se realiza una extracción con agua y posteriormente se realiza una filtración para eliminar impurezas y PET que no reaccionó, lo rescatado en la filtración se pone en un cristizador, y un posterior filtrado para poder obtener en BHET sólido, el EG obtenido se puede recuperar por destilación al vacío (Mariano, 2011).

PIRÓLISIS

Se conoce como pirólisis a termólisis es un proceso de degradación química que implica la romper la estructura molecular de los compuestos, principalmente endotérmicos mediante el efecto del calor y en ausencia de oxígeno produciendo moléculas más pequeñas de cadenas carbonadas, que son reducidas a compuestos de bajo peso molecular en una reacción exotérmica, a temperaturas generalmente entre 400°C y 1000°C, para generar fracciones gaseosas, liquidas y solidas aprovechables, (F. Paradela, 2009).

En la figura 28 se observa un esquema general del proceso de pirólisis, el cual es un proceso de degradación de una sustancia en ausencia de oxígeno en presencia de calor. Las características básicas de dicho proceso se explican mediante bloques.

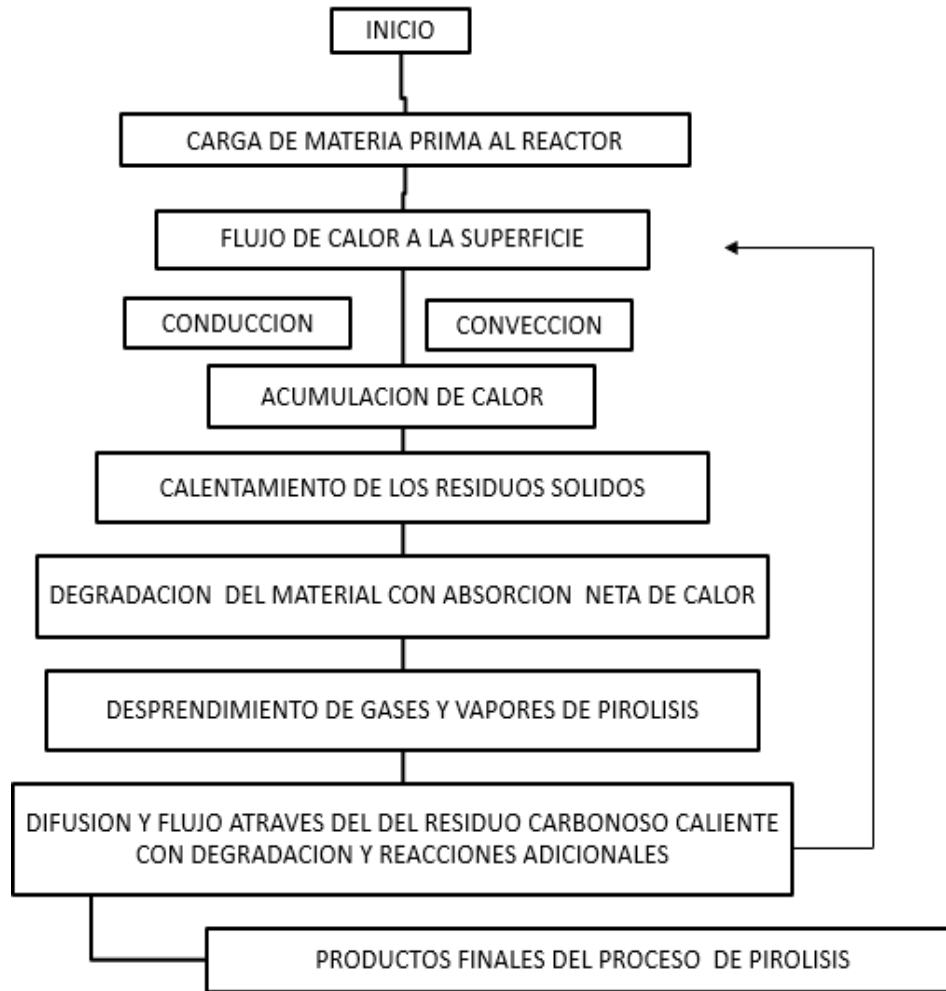


FIGURA 28: Diagrama del proceso de pirólisis (Otto Fernando, 2021).

Como resultado del proceso se obtienen gases, cuyos componentes básicos son CO_2 , H_2 , CH_4 y compuestos más volátiles procedentes del cracking de las moléculas orgánicas, conjuntamente con los ya existentes en los residuos. Este gas es muy similar al gas de síntesis obtenido en la gasificación, pero hay una mayor presencia de alquitranes, ceras, etc. en detrimento de gases, debido a que el pirólisis trabaja a temperaturas inferiores a la gasificación.

Los residuos líquidos, son compuestos básicamente por hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, ceras formadas al condensar a temperatura ambiente.

El residuo sólido, compuesto por todos aquellos materiales no combustibles, los cuales o bien no han sido transformados o proceden de una condensación molecular con un alto contenido en carbón, metales pesados y otros componentes inertes de los residuos.

.

Tipos de pirólisis

El proceso de pirólisis puede clasificarse en lenta y rápida, dónde está relacionado directamente con la velocidad de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$ o $^{\circ}\text{K}/\text{s}$):

- Lenta: los residuos se calientan con valores menores entre 400 y 600 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, ayuda mayormente a la formación de carbón y fracción gaseo (Brown, 2018).

Dicha de otra manera, el tiempo necesitado para calentar el combustible a temperatura del proceso de pirólisis es muy superior al tiempo de reacción de la pirólisis. Para aumentar la producción de productos líquidos (combustible) de alta calidad, se puede aplicar el concepto de pirólisis lenta (Otto Fernando, 2021).

La ventaja del pirólisis lento sobre la pirólisis rápida es particularmente la larga duración en la pirólisis lenta conduce a una transferencia de calor superior, un mejor control sobre los caudales de entrada y salida con un alto rendimiento del líquido (Otto Fernando, 2021).

- Rápida: Se lleva a cabo entre 500 y 900 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; en dónde el vapor de pirólisis resultante se elimina muy rápido de la zona de reacción, promoviendo la obtención de una fracción líquida en mayor porcentaje (Brown, 2018).

En la figura 29 se muestran algunas diferencias más relevantes entre la pirólisis lenta y rápida, donde podemos darnos cuenta de las diferencias en los rendimientos. En la pirólisis lenta los líquidos de 30 a 50 % en peso y rendimientos de carbón de 25 a 35 % en peso. La pirólisis rápida donde se tiene una distribución de productos es 60-75 % de líquido, 15-25 % de carbón y 10-20 % de gases no condensables, dependiendo de la materia prima es (Brown, 2018).

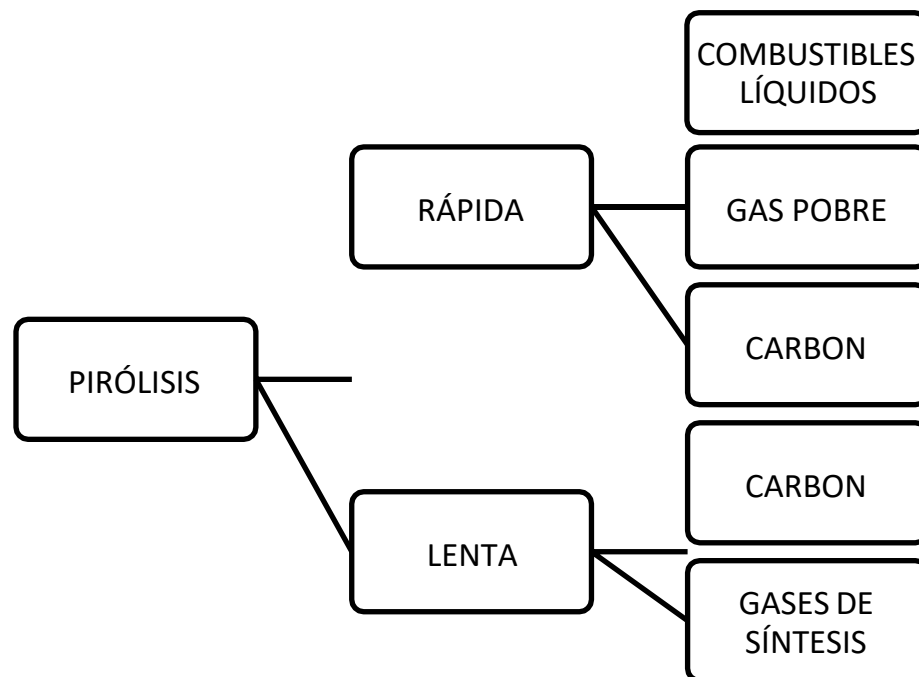


FIGURA 29: Esquema de diferencia entre pirólisis lenta y rápida (Casas, 2014).

Como se observa en la tabla 5, al cambiar la temperatura y la duración de la pirólisis, es posible optimizar uno o más de los tres subproductos de la pirólisis: gas de síntesis, aceite y char (Al-, 2011). La fracción líquida, tiene propiedades y composición similar a los combustibles derivados del petróleo pudiendo ser utilizado como materia prima para la industria petroquímica, mientras que la fracción de gas se puede usar para proporcionar energía en el mismo proceso (M. Sarker, 2011).

TABLA 5: Condiciones de acuerdo con el tipo de pirólisis (Mendoza, 2015).

	Tiempo de residencia	Velocidad de calefacción	Temperatura máxima (°C)	Producto mayoritario
Pirólisis suave				
Carbonización	Horas-días	Muy baja	400	Sólido
Convencional	5-30 min.	baja	600	Gas, líquido y sólido
Pirólisis rápida				
Rápida	0,5-5 s.	Bastante alta	650	Líquido
Flash-líquido	< 1 s.	alta	< 650	líquido
Flash-gas	< 1 s.	Alta	> 650	Gas
Ultra	< 0,5 s.	Muy alta	1000	gas
Vacio	2-30 s.	media	400	líquido
Pirólisis reactiva				
Hidropirólisis	< 10 s.	alta	< 500	Líquido
Metanopirólisis	< 10 s.	alta	> 700	Líquido

El pirólisis se divide en pirólisis térmica y catalítica. La primera implica la descomposición de materiales poliméricos por medio de la temperatura cuando se aplica en condiciones atmosféricas inertes. Este proceso generalmente se realiza a temperaturas entre 400°C y 1000°C. Por otro lado, la pirólisis catalizada promueve estas reacciones de descomposición a temperaturas más bajas y tiempos más cortos, debido a la presencia de catalizadores que ayudan en el proceso. Por lo tanto, la pirólisis catalítica presenta una serie de ventajas sobre la térmica, como un menor consumo de energía y la formación de productos con una distribución más estrecha del número de átomos de carbono, que pueden dirigirse a hidrocarburos aromáticos (J Aguado, 2007).

La pirólisis térmica consume grandes cantidades de energía en comparación de la pirólisis catalítica. Por lo tanto, se han propuesto tecnologías catalíticas para promover el agrietamiento a temperaturas más bajas, lo que resulta en un menor consumo de energía y mayores tasas de conversión (D. S. Achillas, 2007).

Para obtener los biocombustibles se transforma la biomasa, una materia de origen

orgánico, sea vegetal o animal la biomasa se descompone muy rápidamente para generar principalmente vapores y aerosoles condensables, algo de carbón y gas. Las características esenciales de un proceso de pirólisis rápida para biocombustibles se pueden ver en la figura 30 se puede ver que los residuos cambian, después del enfriamiento y la condensación, se forma un líquido homogéneo de color marrón oscuro que tiene un valor de calentamiento de alrededor de la mitad del combustible convencional. Se pueden lograr rendimientos de hasta el 75 % en peso de biomasa seca.

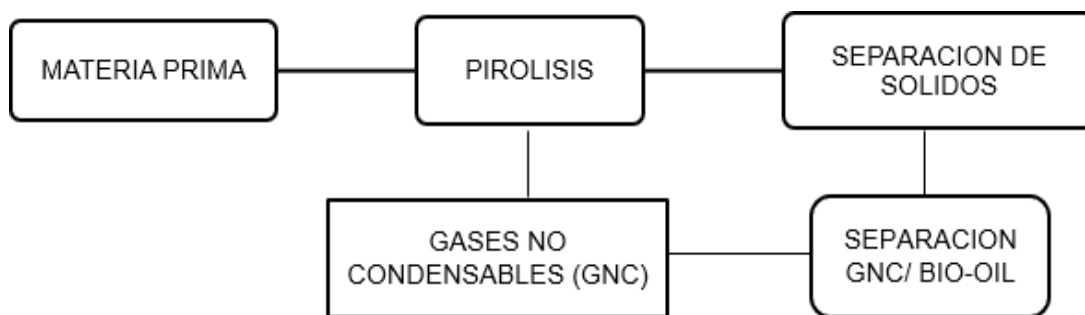


FIGURA 30: Diagrama de bloques del proceso de pirólisis (Noguera, 2020)

Como ya se ha comentado, dentro de la pirólisis la materia orgánica, poco a poco, se va transformando en productos con un alto contenido energético como puede ser el alquitrán, gases de hidrógeno, metano, entre otros más, que pueden ser empleados como combustibles, también se da la formación de aceites ligeros, sales y algunos metales que pueden ser usados como materia prima en algunos otros procesos. El espectro de los productos pirolíticos depende claramente de la composición de la materia a pirolizar; en un estudio se comprobó que un aumento del porcentaje de polietileno en una mezcla con madera aumenta el rendimiento en hidrocarburos comparado con los óxidos de carbono

y la producción de olefinas está en función del contenido en hidrocarburos del material; igualmente un aumento en la cantidad de cenizas de la muestra reducía el rendimiento de alquitrán y aumentaba la producción de gas y agua (Millan, 2014).

PRODUCTOS

La fracción gaseosa obtenida de la pirólisis se considera como un combustible de alto poder calorífico, pudiendo ser utilizado en la fase de calentamiento del mismo proceso, siendo los principales componentes de esta el metano, etano, etileno y propileno.

La fracción líquida se compone de hidrocarburos alifáticos de peso molecular alto, en función al residuo plástico pirolizado, y la fracción sólida o residuo carbonosos obtenida de la pirólisis de polímeros, puede usarse como carbón activado pasando previamente por un proceso de activación (Espinoza Merchán, 2014). La tabla 6 explica la utilidad de los productos de la pirólisis.

TABLA 6: Utilidad de los productos de pirólisis (Espinoza Merchán, 2014).

Productos	Utilidad
Aceite combustible	1. Vendido a plantas de cemento, centrales eléctricas, etc. 2. Procesado en aceite diésel por máquina de destilación, que puede usarse en camiones, automóviles, etc. 3. Puede usarse como combustible para fábricas.
Negro de carbón	1. Hecho en bloque de carbón vegetal por máquina de fabricación de briquetas 2. Procesado en carbono de alta calidad como material de

	calefacción. 3. Venta directa
Gases combustibles	Reciclado como combustible para calentar el reactor.

Gas de pirólisis

La composición del gas depende de gran medida de las condiciones en las que se lleva a cabo la pirólisis. Si la velocidad de calentamiento y la temperatura son elevadas, favorece que la materia orgánica se volatilice y que la proporción de gas aumente. En la fase gaseosa los estudios realizados por diferentes autores revelan la presencia de compuestos de bajo peso molecular y carácter volátil tales como H_2 , CO, CO_2 , gases ácidos como HCL y SO_2 , amoníaco, agua, metales pesados volátiles, nitrógeno azufre y COVs (fundamentalmente CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 con aportaciones menores de C_2H_4 , C_3H_6 , C_4H_8 C_4H_6 y otros hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular) (Williams, 1994).

El poder calorífico del gas de pirólisis depende de los gases combustibles presentes, para temperaturas superiores a 700 °C se obtiene un gas combustible con un poder calorífico entre 14.5 y 16 MJ/Nm³, mientras que para temperaturas iguales o inferiores y obtiene un gas rico en hidrocarburos con un poder calorífico más elevado (entre 14 y 19 MJ/Nm³), por otro lado, a partir del análisis del gas obtenido a 720 °C o más con velocidades de calentamiento de 5, 20, 40 y 80 K/min se obtienen valores de poder calorífico de 13.9 a 19 MJ/Nm³ (Williams, 1994).

- Combustión: Debido a su elevado poder calorífico se quema para producir energía en la cámara de combustión. Se trata de la opción más habitual en las plantas de pirólisis

en Europa. Su beneficio frente a la incineración convencional es que se necesita un menor exceso de aire, con el tratamiento de gases de combustión puede realizarse con equipos más pequeños (Williams, 1994).

- Gasificación: Esta opción tiene lugar en determinados métodos de gasificación, en los que se lleva a cabo la pirólisis previa. La aplicación previa de un agente de gasificación para obtener un gas de síntesis hace que aumente la proporción de CO y H_2 respecto a la del gas de pirólisis original (Williams, 1994).

Aceite de pirólisis

La fase líquida obtenida mediante condensación consta a su vez de dos fases una acuosa y otra aceitosa viscosa que es necesario separar. Una forma sencilla de separarlas es mediante centrifugación y decantación. La fase acuosa que contiene HCl y compuestos orgánicos (cetonas, ácidos carboxílicos, fenol), no tiene interés económico para un aprovechamiento energético, por lo que es un residuo a tratar (Williams, 1994).

En los aceites de pirólisis se han detectado la presencia de ácidos carboxílicos (fórmico, acético, málico, acrílico) junto con otros derivados de dichos ácidos, se han identificado también aldehídos, cetonas, alquenos, esterres y alcoholes en estos aceites, así como compuestos aromáticos policíclicos. La fracción alifática de los aceites generados en pirólisis de RSU es superior a la presente en la pirólisis de residuos de madera (un 20 a un 8%) mientras que la fracción de compuestos oxigenados es inferior (30% frente a un 50%).

El poder calorífico de los aceites de pirólisis tras la separación de la fase acuosa se encuentra en un torno a 25 1MJ/kg. Aunque también se han descrito 22.2 MJ/Kg para aceites secos y 24 MJ/Kg para aceites de pirólisis flash. Para aceites mezclados con la

fase acuosa toma un valor de 20 MJ/Kg no obstante se ha llegado a la conclusión de que la pirólisis de RSU para obtener principalmente un líquido combustible, no es viable económicamente en comparación con otros esquemas de aprovechamiento energético, por tanto, aunque en determinadas condiciones de operación se podría llegar a generar un combustible líquido en plantas de pirólisis de RSU no se suele dirigir la operación hacia esta fracción sino principalmente a la formación de gas. En la mayor parte de los casos no se llegan a condensar los aceites y se queman en la cámara de combustión (Williams, 1994).

Char

El contenido en cenizas del char aumenta a mayor temperatura y velocidades de calentamiento, mientras que el contenido en oxígeno disminuye al aumentar la temperatura. El contenido de azufre aumenta cuando mayor es la temperatura e independiente de la velocidad de calentamiento, mientras que en cuanto al contenido de nitrógeno no se puede hablar con seguridad de una cierta tendencia con la temperatura. (Williams, 1994).

El char obtenido a partir de RSU presenta un elevado contenido en cenizas lo que limita en parte su uso como combustible a pesar de su poder calorífico (19 ± 1 MJ/Kg) por otro lado la superficie específica crece tanto con la temperatura como con la velocidad de calentamiento.

Esto se explica por la presencia de hidrocarburos de elevado peso molecular en la superficie que, al volatilizarse con el incremento de temperatura, producen un aumento de la superficie específica, las cuales son reducidas en comparación con la de los carbones procedentes de otras fuentes, además el tamaño de partícula, el contenido de ceniza y la presencia de hidrocarburos sólidos pueden limitar el empleo de estos carbones (Williams, 1994).

Debido a su composición y propiedades el residuo sólido carbonoso que se genera durante el proceso de pirólisis de RSU a escala industrial se puede gestionar de 3 maneras diferentes.

Combustión. Debido a su elevado poder calorífico se suele quemar en la cámara de combustión para la producción de vapor, energía eléctrica y como fuente de calefacción del reactor.

Gasificación El material sólido generado se somete a un proceso de gasificación con aire en proporciones sub estequiométricas, con vapor de agua u oxígeno puro para la producción de gas de síntesis. Esta opción se aplica en métodos que combinan pirólisis y gasificación.

Valorización material. El Residuos sólidos puede tener propiedades similares a las del coque y en algunos casos se comercializa, con lo que supone una fuente de ingresos extra para la planta. No obstante, el residuo de partida, así como las condiciones en que se lleva cabo la pirólisis determinan el uso posterior que pueda tener este material dentro de la planta (Williams, 1994).

Los compuestos sólidos formados tienen propiedades adsorbentes y carácter reductor, además de una gran recalcitrancia interna. En los suelos su presencia no origina problemas o limitaciones, sino que tiene un efecto benéfico ya que aunque son muy recalcitrantes frente al metabolismo microbiano y a los mecanismos de oxidación microbiana y de oxidación inorgánica, tienen propiedades importantes como son la alta capacidad de adsorción de iones, metales pesados, compuestos orgánicos, líquidos y gases o sus posibles interacciones con otros componentes coloidales del suelo al tiempo que contribuyen a mantener en los sumideros edáficos una importante cantidad de carbono recalcitrante (Williams, 1994).

PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

Las características de las tres principales fracciones de componentes que resultan de la pirólisis son:

- La corriente de gas que puede contener distintos compuestos gaseosos dependiendo de las características orgánicas del material que es pirolizado y de las condiciones de operación.
- La fracción condensable, líquida a temperatura ambiente, integrada por un conjunto heterogéneo de vapores.
- Un coque o char residual consiste en carbono casi puro mezclado con el material inerte que entra en el proceso.

Se ha encontrado que la distribución de las fracciones producto de la pirólisis, varía con la temperatura a la que se lleva a cabo la pirólisis.

Como ya se ha comentado, dentro de la pirólisis la materia orgánica, poco a poco, se va transformando en productos con un alto contenido energético como puede ser el alquitrán, gases de hidrógeno, metano, entre otros más, que pueden ser empleados como combustibles, también se da la formación de aceites ligeros, sales y algunos metales que pueden ser usados como materia prima en algunos otros procesos.

El espectro de los productos pirolíticos depende claramente de la composición de la materia a pirolizar; en un estudio se comprobó que un aumento del porcentaje de polietileno en una mezcla con madera aumenta el rendimiento en hidrocarburos comparado con los óxidos de carbono y la producción de olefinas está en función del contenido en hidrocarburos del material; igualmente un aumento en la cantidad de cenizas de la muestra reducía el rendimiento de alquitrán y aumentaba la producción de gas y agua. (Gray, 1985) Un análisis elemental de la materia prima (C, H, O) permite explicar las diferencias cuantitativas en los productos de pirólisis. La causa de que la pirólisis de unos materiales produzca más gases que la de otros reside en la diferencia

de densidades, ya que una mayor densidad provoca que los alquitranes queden retenidos en las partículas más tiempo y que una fracción más grande de ellos se transforme en gas (Casas, 2014). Los subproductos formados van a depender también de la temperatura del proceso y la velocidad de calentamiento (Casas, 2014).

VARIABLES QUE AFECTAN LA PIRÓLISIS

TEMPERATURA:

La temperatura es uno de los parámetros operativos más importantes en la pirólisis, ya que controla la reacción de desintegración de las cadenas de polímeros. Las moléculas son atraídas juntas por fuerzas de Van der Waals, y esto evita que las moléculas se colapsen.

Cuando la temperatura en el sistema aumenta, la vibración de las moléculas en el interior del sistema será mayor, y por tanto tenderán a evaporarse desde la superficie. Esto sucede cuando la energía inducida por las fuerzas de Van der Waals a lo largo de las cadenas de polímero es mayor que la entalpía del enlace C–C en la cadena, dando lugar a la ruptura de la cadena de carbono (Anuar Sharuddin, 2016).

Existen 3 etapas de temperatura en un proceso de pirólisis y estas son: En la primera etapa, entre 220°C - 330 °C la mayor cantidad de producto obtenido a partir de la degradación de los residuos es la fracción sólida (coque, ceniza) (Otto Fernando, 2021). Seguido de 330 °C – 450°C los productos líquidos obtenidos tienen un elevado rendimiento y consecuentemente los gases se obtienen en menor cantidad. Finalmente, temperaturas sobre los 800 °C en esta instancia los residuos plásticos superan su punto de ebullición, generando gases con mayor rendimiento (Otto Fernando, 2021).

DENSIDAD Y HUMEDAD:

Influye en la carbonización ya que al aumentar la humedad la madera favorece la carbonización y disminuye la formación de aceites (Ferrer, 1996). Si la muestra tiene un elevado contenido de agua, una parte del calor entregado para la degradación de los plásticos será consumido para el secado de la muestra, por lo que la temperatura de degradación se reducirá, así obteniendo favorablemente la fracción líquida y sólida (Otto Fernando, 2021).

VELOCIDAD DE CALEFACCIÓN:

Es la velocidad con respecto al tiempo necesario para que se lleve a cabo la descomposición del material. La velocidad de calefacción puede ser lenta y flash. En un proceso de pirólisis lenta, la fracción sólida eleva su rendimiento descendiendo el de los líquidos y gases. Mientras que en un pirólisis flash, ayuda a la formación mayoritaria de productos líquidos y gaseosos, empleando velocidades de calefacción superiores a 250 K/s (Otto Fernando, 2021).

TIEMPO DE RESIDENCIA:

Tiempo requerido para que se lleve a cabo la descomposición del material de forma óptima. Mientras más largos sean los tiempos de residencia, favorecen mayoritariamente a la obtención de coque, alquitrán y también productos que son estables térmicamente (Otto Fernando, 2021).

CANTIDAD DE MATERIA PRIMA:

Variable que desea descompuesta y que afecta directamente a las otras variables.

TAMAÑO DE PARTICULA:

El tamaño de partícula influye ya que la transmisión de calor es más factible mientras esta es más pequeña sea la partícula.

ATMOSFERA DE REACCION:

Hace referencia a la utilización de gases inertes y vapores condensables.

PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO:

Es un parámetro primordial para el diseño mecánico del reactor, ya que a través de este parámetro se calculará el espesor del recipiente a presión (Otto Fernando, 2021).

CATALIZADORES:

Sustancia que modifica la velocidad de reacción.

COMPARACION DE METODOS QUIMICOS

La pirólisis presenta la principal ventaja ante otros es que puede manejar un gran volumen y la disminución de las emisiones gaseosas asociadas a su tratamiento, mientras que la demanda de energía constituye en su principal desventaja, que se puede superar haciendo de dicho proceso uno en el que se aproveche al máximo los productos obtenidos (Daza, 2019). En la tabla 7 se realiza un análisis de los aspectos económicos y ambientales de metanólisis, hidrogenización, gasificación y pirólisis.

TABLA 7: Comparación de métodos químicos (Daza, 2019).

TECNOLOGÍA	ASPECTOS	
	ECONOMICOS	AMBIENTALES
PIRÓLISIS	Se requiere de alta inversión para la instalación y compra de equipos (hornos pirolíticos). La alimentación requiere pretratamiento para que se introduzca el material homogéneo y con humedad adecuada para que no afecte el rendimiento. Los costos de inversión están ligados a la cantidad de material con el que se dispone para trabajar. Los costos se encuentran asociados básicamente a los procesos de refinado a los que deben ser sometidos los hidrocarburos líquidos obtenidos. Operaciones de	El producto es una fracción líquida de fácil de manipulación, transporte y almacenado. Reducción de las emisiones a la atmósfera (óxidos de nitrógeno y azufre) por ser un proceso cerrado. Admite como combustible (alimentación) material residual de otros procesos. Tanto los productos o subproductos generados, cuentan con características para ser reutilizados. Proceso autosuficiente en el consumo de la energía. Genera como residuo de ceniza producto de la combustión térmica que se realiza dentro del horno pirolítico, empleada en la fabricación de madera plástica. Los productos generados como los hidrocarburos líquidos

	mantenimiento que se deben realizar para tratar las cenizas resultantes del proceso es de costos elevados.	deben ser sometidos a un proceso de refinación posterior (Suarez, 2011).
HIDROGENIZACIÓN	Proceso de elevados costos de implementación por su baja industrialización.	Genera como productos materiales muy puros, que no requieren extensos tratamientos posteriores para su refinación, Conserva el recurso hídrico y minimiza la implementación de químicos para su tratamiento. Genera problemas de corrosión derivados del HCL y otros compuestos durante el proceso (Klug, 2012).
GASIFICACIÓN	Tecnología de baja implementación en la actualidad. Herramienta en periodos de carencia o escasez de combustibles ligeros. Tecnología de elevados costos de	Versatilidad en la valorización de residuos. Producción de gas con características de combustible El producto puede ser usado para la generación de electricidad,

	implementación por su baja industrialización (Cancino, 2011).	calor o como materia prima para la manufactura de productos químicos sin contribuir a la generación de gases efecto invernadero. Concentración e inmovilización de componentes inorgánicos. Reducción en la emisión de concentraciones de partículas de óxidos de nitrógeno y de azufre, debido a la limpieza del gas de síntesis.
METANÓLISIS	Tecnología de elevados costos de implementación por su baja industrialización.	Genera las moléculas básicas de los materiales plásticos post-consumo El producto de esta tecnología presenta características similares a la resina de plástico virgen. Esta tecnología contribuye a la conservación y preservación del recurso natural no renovable. Disminución de los impactos ambientales

		asociados a la obtención de la materia prima de los materiales plásticos. Requiere de una clasificación previa acorde al tipo de resina para su óptimo rendimiento y calidad del producto (Velasco, 2011).
--	--	--

TIPO DE REACTORES

El tipo de reactor utilizado en el pirólisis de plásticos es muy importante en el proceso, ya que condiciona las variables que se pueden emplear y la calidad de los productos obtenidos.

REACTORES DISCONTINUOS

Son reactores discontinuos que someten la muestra, depositada inicialmente en el reactor, a una rampa de calentamiento hasta alcanzar la temperatura deseada. Los sistemas de reactores discontinuos tienen en común 4 etapas, las cuales se llevan a cabo en secuencia: etapa de llenado, para la adición de sustrato al reactor; etapa de reacción, en la cual el reactor se somete o no a aireación; dependiendo de las necesidades del tratamiento, etapa de sedimentación que permite la separación de sólidos para lograr un sobrenadante clarificado como efluente; y etapa de vaciado, cuyo propósito es la extracción del agua clarificada del reactor (Cárdenas, 2006)

REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

El reactor de lecho fluidizado es muy utilizado en los procesos de degradación de polímeros debido a sus buenas características de transferencia de calor, que facilitan la consecución de un régimen isoterma. También puede destacarse la versatilidad de los equipos de lecho fluidizado para el tratamiento de mezclas de materiales plásticos (Morales, 2008).

SEPARADORES

Como se ha revisado en el proceso de pirólisis con residuos plásticos se genera la obtención de combustible sintético líquido, residuos carbonosos y gas de hidrocarburos, con el posterior fraccionamiento del combustible sintético líquido con obtención de fracciones de gasolina y diésel, gas de hidrocarburos y residuo de destilación en forma de fracción pesada de hidrocarburos (Álvarez, 2009). Por lo que es necesario un separador de hidrocarburos, ya que permite la separación de estos de acuerdo a su densidad, así se puede hacer el almacenamiento de los hidrocarburos recuperados. En la figura 31 se puede visualizar un separador de hidrocarburos de la empresa.

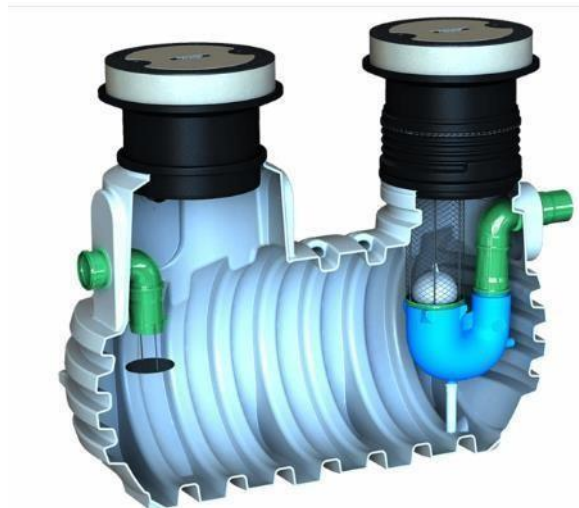


FIGURA 31: Separador modelo DC1,5 (Graf, 2022).

En la tabla 8 se muestra un separador de combustible el cual alcanza un grado de separación de menos de 100 mg de aceite por minuto.

TABLA 8: Características del separador de hidrocarburos modelo DC1,5 (Graf, 2022).

Modelo	DC1,5
Tamaño	10 T (L/s)
Precio €	2.500,00
Volumen	3330 L

INTERCAMBIADOR DE CALOR

Un intercambiador de calor es un equipo utilizado frecuentemente en la industria de los hidrocarburos, el cual puede condensar o evaporar fluidos de servicio o de proceso, superar presiones, temperaturas extremas, condiciones de incrustación (Tranter, 2022).

En la figura 32 podemos ver un intercambiador de calor que cuenta con un ataque anti corrosivo que soporta líquidos, gases, vapor y mezclas bifásicos (Tranter, 2022).



FIGURA 32: Intercambiador de calor modelo SUPERMAX (Tranter, 2022).

En la tabla 9 podemos ver las características más importantes del Intercambiador de calor modelo SUPERMAX (Tranter, 2022).

TABLA 9: Características del intercambiador de calor (Tranter, 2022).

Peso kg (lb)	6.350 (14.000)
Rendimiento térmico	1°C (2°F) -
Caudal másico	2500 lb/hr
Capacidad calorífica	8,32 - 9,21 Btu/lb°F
Costo	15, 321.72 pesos
Modelo	SUPERMAX

CAPITULO III. DESARROLLO

Con la información recopilada se propone el método mecánico de recuperación de polietileno y los equipos a utilizar.

Se aumentará un 0.01% de reciclaje anual de polietileno con respecto al que se recupera actualmente a nivel nacional con la implementación de esta nueva planta.

De acuerdo con la revisión bibliográfica comparará y elegirá un procedimiento de recuperación química.

Se realizará dos simulaciones de pirólisis de polietileno. La primera será con H₂ como gas inerte para compararla con una simulación de mezcla de polímeros.

Se verificará la obtención de gases de combustión con la simulación para que el proyecto pueda ser viable.

Obtención como principal producto principal el metano y etano.

Se analiza el impacto ambiental que tiene la recuperación de polietileno.

CAPITULO IV. RESULTADOS

DIFUSION

Comunicación y fomento a la educación:

Es importante fortalecer la cultura ambiental de la ciudadanía y las empresas productoras a fin de prevenir y disminuir la generación de residuos, su impacto dentro de los ecosistemas naturales, la biodiversidad y el cambio climático, así como concientizar

sobre el impacto ecológico que los productos consumidos al ser residuos sobre los ecosistemas naturales y la biodiversidad. Se fomentará el consumo responsable con el esquema de la economía circular.

Consumo responsable, y las 4R: Reducir, Reusar, Reciclar, Recuperar.

El consumo responsable:

- Reducir: Racionalizar la cantidad de los productos plásticos consumidos.
- Reutilizarlos: Por ejemplo, las bolsas plásticas se pueden reutilizar como bolsas de residuos.
- Reciclar: es la acción de separar los residuos de forma correcta.
- Recuperación: aprovechamiento como materia prima para la fabricación de nuevos productos y su conversión como combustible o como nuevos productos químicos

Separación en origen de los plásticos pos consumo. En la figura 33 se explica cómo es la economía circular vez finalizada la vida útil de los plásticos, los cuales deben ser separados de forma correcta y no arrojados en la vía pública, parques, plazas o playas.

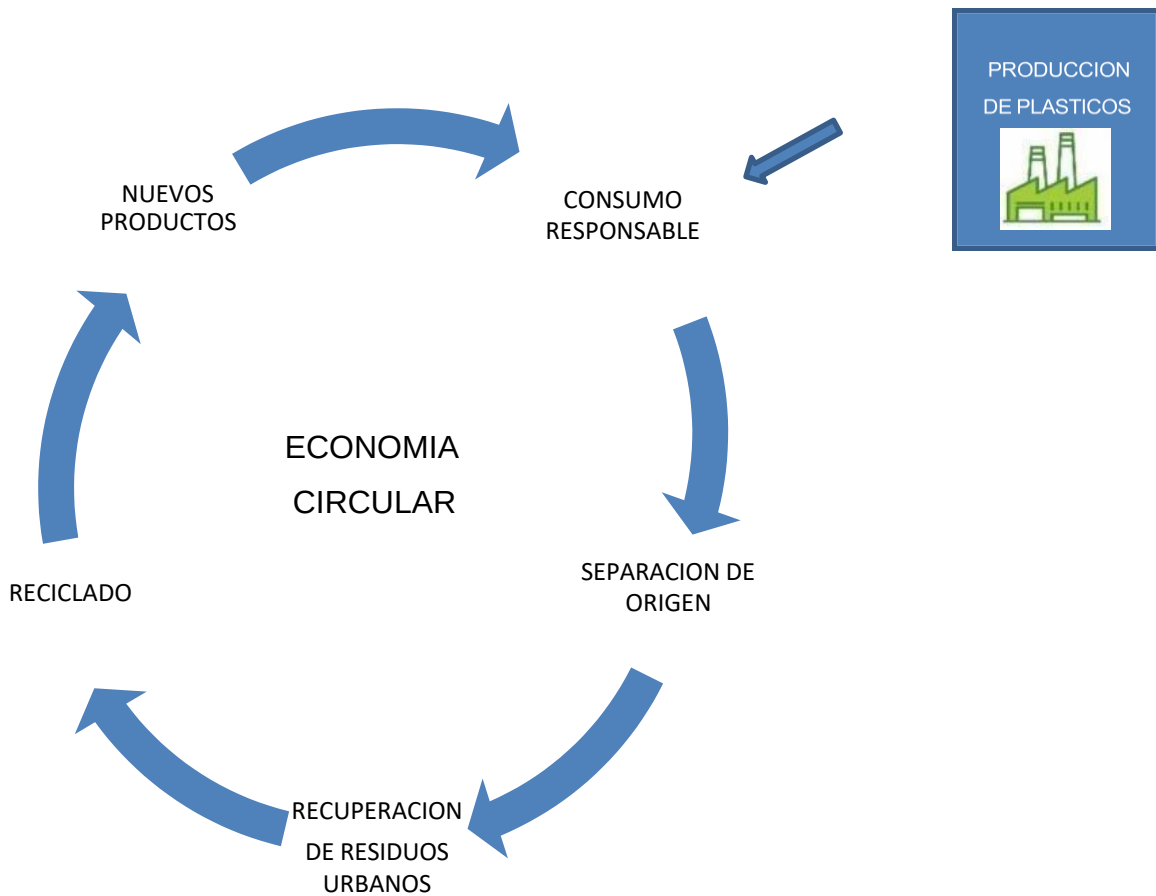


FIGURA 33: representación del esquema de una economía circular (ANUIES, 2021).

SELECCIÓN DE EQUIPOS Y MODO DE OPERACIÓN

ACOPIO

El método de acopio será la compra de polietileno preseleccionado. Al recibir la materia prima se realiza una identificación y clasificación del material con el objetivo de obtener una mejor recuperación del material para tener materia prima de alta calidad (Sierra, 2001).

En México se tiran al día poco más de 15 mil toneladas de desechos plásticos –casi 500

millones son botellas de polietilentereftalato (PET)– de los cuales se calcula que entre 15

y 20 por ciento provienen de habitantes de ciudades y el resto de las actividades productivas que aumentaron durante la pandemia (ANUIES, 2021).

Como se mencionó anteriormente el polietileno es lo que más se recicla en México al representar el 51.2 por ciento del volumen total de materiales reciclados a nivel nacional, que es de un millón 913 mil 710 toneladas por año, según informes de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (Anipac). Se propone aumentar un 20% de aumento de este reciclaje con la implementación de esta nueva planta, lo cual representaría un 20.3 toneladas por día.

SEPARACIÓN

De los métodos de separación antes vistos (separación manual, separación por densidad, separación Triboeléctrica, espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR)), se utilizarán el método manual, para evitar contaminantes y poder garantizar la pureza del material recuperado.

Las consideraciones para garantizar la eficiencia de la separación manual de materiales plásticos deben de analizarse los diferentes factores de impacto (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009):

Grado de contaminación del material a clasificar: La remoción previa de materiales extraños o contaminantes, aumenta la eficiencia y productividad en la etapa de separación.

Secuencia de separación de materiales: El primer plástico a separar de una corriente de materiales, debe ser el de mayor volumen.

Densidad de los materiales. Factor importante para considerar en la selección del método de separación.

La banda transportadora debe reunir los siguientes requisitos: Alta resistencia mecánica longitudinal, flexibilidad en direcciones longitudinal (en tambores) y transversal (en apoyos de rodillos), elevada resistencia al desgaste y a la desestatificación por reiterados dobleces, poca elasticidad y alta resistencia a la humedad. En la figura 34 se muestran cuáles son las partes de una transportadora.

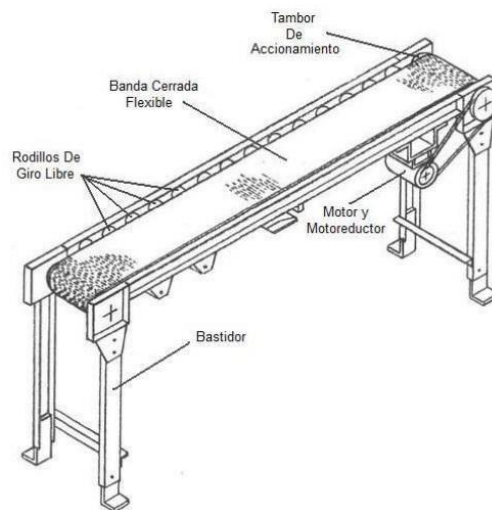


FIGURA 34: Partes de una banda transportadora (José Armando Castro Medina,2011).

Se requiere que la banda tenga un ancho 12 ft y Altura Ajustable (pulg.)26-1/2 a 38 de largo con las siguientes características:

Superficie lisa.

- Se fabrica en base a necesidad del cliente, en longitud y ancho.
- Su capa de nitrilo cuenta con la capacidad y cualidad de ser anti adherible, por lo que los restos de maíz cocido no se pegaran a la superficie de la cinta.
- Su estructura textil, ofrece 3 veces más resistencia que una sin refuerzo de material de este tipo.

En la figura 35 se puede observar una banda transportadora de la marca SICSA BANDAS su costo de compra de la cinta es de alrededor de \$35,000.00.



FIGURA 35: Banda transportadora de alimentación a molino triturador (SICSA BANDAS,2021).

La banda se tendrá en dirección vertical, para que tenga dirección a la tolva del molino con el objetivo de que el material pre seleccionado sea dirigido a la continuación del proceso.

MOLIENDA

La molienda del polietileno generalmente se realiza en molinos de desgaste de alta velocidad que muelen de aproximadamente $3/16$ – $1/4$ de pulgada (5–6 mm) de diámetro hasta la distribución de tamaño de partícula requerida. Un molino de desgaste utiliza un disco fijo y uno giratorio con una serie de cuchillas mecanizadas dentro de una carcasa del molino. En la figura 36 se puede observar un ejemplo de molino de cuchillas (Sierra, 2001).



FIGURA 36: Molino de cuchillas MODELO VMPC-600FILM (Asian Machiney USA,2022).

Equipo diseñado para la utilización de cuchillas tipo V especiales para trabajos con películas o fundas, cuenta con un motor de 30 HP con el cual puede alcanzar rangos de producción de hasta 15 ton/Hr. Las características de la figura 36 se observan en la tabla

10 (Asian Machiney USA, 2022).

TABLA 10: Características molino de cuchillas MODELO VMPC-600FILM (Asian Machiney USA, 2022).

MODELO VMPC-600FILM	
PRODUCCIÓN	15 ton/HR
POTENCIA	22 KW
BOCA	5x9 M
DIMENSIONES	13x19.7x17.5 M
PESO	1100 ton

Con los avances en tecnología de corte y diseño de máquinas, reducciones en el consumo de energía y una mayor automatización disponible para los sistemas de trituración, hay muchas soluciones rentables disponibles para proporcionar calidad de molienda en el proceso de fabricación sin afectar negativamente los porcentajes de producción, la calidad de la parte o el ambiente de la planta (Sierra, 2001).

Las unidades de producción utilizan configuraciones de molino simple, doble y triple de acuerdo con el rendimiento requerido, por lo que es importante identificar las partes del molino y su funcionamiento para tener una molienda que nos brinde como resultado la hojuela de dimensiones correctas (Sierra, 2001). En la figura 37 se pueden observar las partes de un molino.

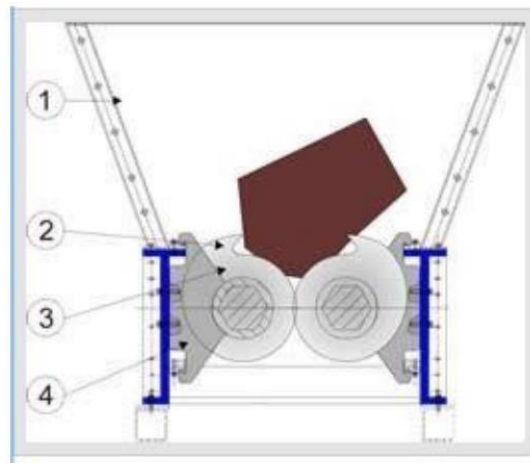


Figura 10. Máquina trituradora
Fuente: ISVE S.R.L.- TRITOTUTTO (2016)

FIGURA 37: Partes del molino (Mauricio F, et al 2009).

La máquina trituradora posee las siguientes partes (Mauricio F, et al 2009):

1. Unidad de carga

Llamada también tolva en esta parte de la maquina es donde empieza la trituración pues el material es depositado.

2. Sistema de trituración

En esta parte es donde se realiza el proceso de trituración, en esta zona de encuentran

alojadas las cuchillas que son las encargadas de realizar el corte de plástico para convertirlo en pequeños tozos.

3. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión está constituido por un motor eléctrico de corriente alterna acoplada con un motor reductor que esta conjuntamente unido al eje que contiene las cuchillas.

4. Sistema de seguridad

Este sistema esta adecuado en la máquina para prevenir las posibles sobrecargas que se puedan generar durante el proceso de trituración, su función consta en invertir temporalmente el motor al detectar un atasco y evitar que puedan suceder problemas mayores e incluso la rotura total de la máquina (Sierra, 2001).

Trabajando 5 días a la semana dos turnos de 8 horas por día y tomando un mes como descanso de maquinaria entre mantenimiento y días feriados, se estima una molienda 2 mil 800 toneladas recuperadas en un año. Esto representara un aumento del 0.012 % sobre el polietileno recuperado a nivel nacional en la actualidad (Sierra, 2001).

LAVADO Y SECADO

En general los procesos de separación, lavado y trituración son muy importantes, puesto que permiten eliminar suciedad, adhesivos, etiquetas y otros polímeros, pues permiten además una homogeneización del material que alcanza casi el 100% de pureza con una cierta humedad (Conde, 2013).

Con el material molido se procede a lavarlo con el objetivo de eliminar polvo o identificar materia prima no compatible, el material se puede lavar con sosa para quitar las impurezas, sin embargo, no se realizará este lavado químico (Conde, 2013).

Se podrá utilizar un tanque de agitación de 1,279L para trabajar en un rango de 400 a 1,000L. El equipo está fabricado en acero inoxidable 304 calibre 10 grado alimenticio. Para la descarga cuenta con válvula de 2" clamp en el fondo cónico. Se incluyen patas con niveladores. Medidas interiores del tanque de 114cm de diámetro por 122cm de altura del vaso más 10cm de altura de cono (Conde, 2013). En la figura 38 puede visualizarse un ejemplo de un tanque de lavado.



FIGURA 38: Foto externa del sistema de lavado modelo TQA1000LNPTVAP(Copyright, 2018).

El tanque de agitación modelo TQA1000LNPTVAP se tiene un sistema de agitación de tipo ancla con raspadores de 5HP con velocidad fija de 29RPM, se incluye gabinete de control con selectores para encendido del motor con botón de paro y emergencia. (cable del gabinete a alimentación general no incluidos) (Conde, 2013).

El equipo requiere de conexión trifásica 220V. Ideal para procesos de mezclado donde se requiere mantener en suspensión el producto, la agitación es lenta, pero con gran área

de contacto ideal para productos viscosos (Copyright, 2018). En la figura 39 puede verse el interior del tanque de lavado.



FIGURA 39: Modelo interno del sistema de lavado modelo TQA1000LNPTVAPRF5.
(Copyright, 2018)

El lavado se realizará una agitación por 30 minutos a velocidad fija de 29RPM para que el material se logre limpiar y separar a una temperatura ambiente. El costo del sistema es de \$275,946.00 MXN (Copyright, 2018).

SECADO

Todos los materiales poliméricos durante la síntesis, el transporte y el almacenamiento tienen una tendencia a retener la humedad, alcanzando un valor de equilibrio con el medio ambiente, que depende del tipo de polímero, de la humedad y de la temperatura del aire, del tamaño del gránulo o de la pieza (Saigh, 2005). En la figura 40 podemos observar un esquema de un secador.

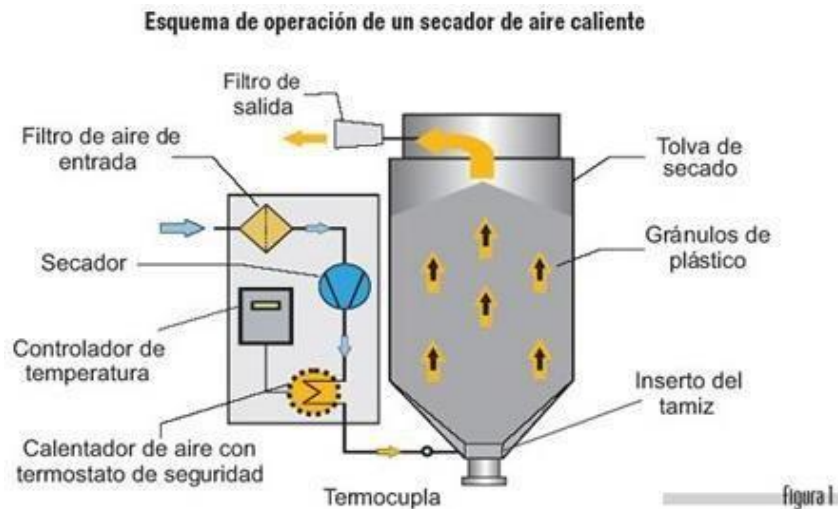


FIGURA 40: Esquema de operación de un secador de aire caliente (Saigh, 2005).

La velocidad a la cual el secado es realizado está determinada por la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se llevan a cabo. La transferencia de energía, en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de convección, conducción y radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos (Saigh, 2005). En la tabla 11 se explican las funciones de las partes del sistema de secado.

TABLA 11: Partes de la línea de lavado-secado de plástico (Saigh, 2005).

PARTES	OBSERVACIONES
Lavadora caliente	Agua caliente con soda deshacer pegamento, aceite, etc. Puede ser caliente por vapor, eléctrico o fuego directo
Bandas	Transporte del plástico convertida en Escamas
Tanques	Separar PP, PE, Y otras impurezas flotantes desde Pet

Centrífuga	Remover agua con centrifugado
Sistema de aire caliente	Llevarse la humedad

El polietileno recuperado se centrifuga y se secan las hojuelas de polietileno para posteriormente secarlo con un sistema de aire caliente (Sierra,2001). Existen diferentes tipos de secado como se muestra en la tabla 12.

TABLA 12: Comparación de sistemas de secado (Saigh, 2005).

Sistema	Consumo de energía por 1 kg de PC (W-h/kg)	Punto de rocío (°C)	Tiempo de secado (hr)
Secadores de aire caliente*	58	ambiente	4
Secadores de aire caliente con recuperación de energía	47	ambiente	4
Secadores de aire comprimido	261	-20°C	3
Secadores de vacío	61	-40°C	0.66
Secadores infrarrojos	--	ambiente	3
Secadores de disecante	64	-40°C	2.5
* Para PC, los secadores de aire caliente sólo son una opción si la humedad relativa y la humedad inicial son bajas.			

Para un sistema de secado que tenga una capacidad de 700 kg de material con secado de aire caliente. La temperatura de proceso de secado podrá estar en un rango de 70 a hasta 110°C, Flujo de aire de secado = 2800*2/3 cfm. Con un tiempo de residencia de 2 horas. En el proceso de lavado y secado puede generar una pérdida aproximada del 15% de merma, lo cual nos indicaría que por cada 634 kg molidas y lavadas se tendría una merma aproximada de 95.1 kg, por lo cual se empaquetarían 538.9 kg de material.

EMPAQUETADO

Con el material seco se procede a empaquetar para su almacenamiento y posterior venta o reciclaje químico (Sierra, 2001). Los paquetes serán costales de 25 kg.

ELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECUPERACIÓN

Se realizará una comparativa económica de inversión total en los procesos de recuperación térmica, para los desechos sólidos urbanos. Los son procesos complejos que ofrecen una alternativa de reducción de estos materiales en los rellenos sanitarios, pero la inversión que se requiere es alta. En la figura 41 se pueden observar una comparativa del capital de inversión necesario dependiendo del tipo de proceso químico de recuperación.

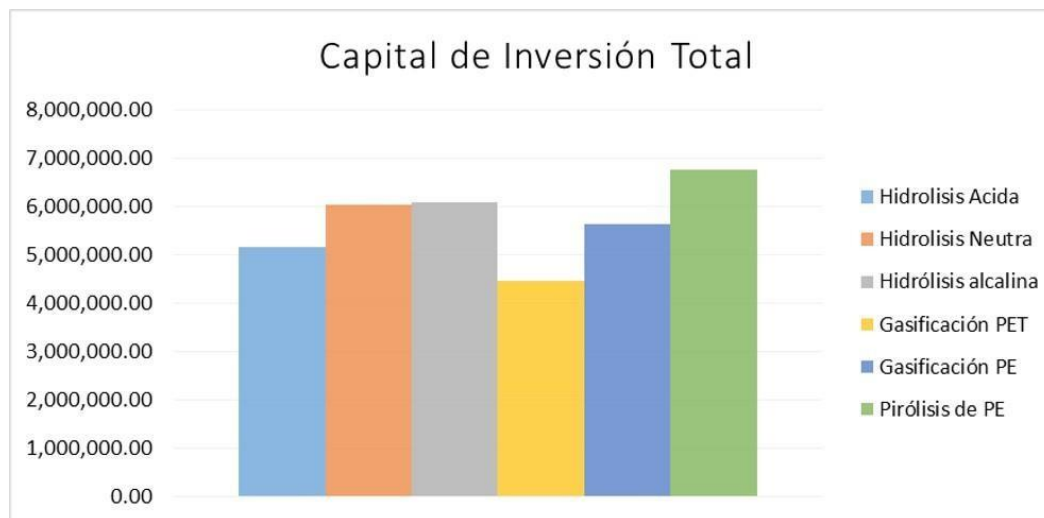


Figura 41: Costo de inversión para los diferentes procesos (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009).

Estas tecnologías cumplen con los requisitos normativos para el control de emisión de

contaminantes, lo cual es muy representativo para cumplir con las normas de medio ambiente, sin embargo, debe tomarse en cuenta el costo de operación que tienen. En la figura 42 podemos comparar los costos de operación.

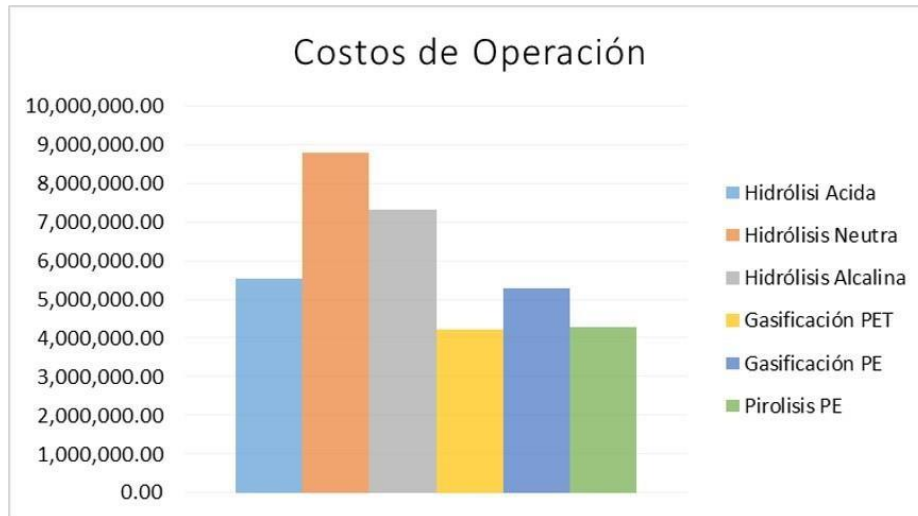


Figura 42: Costos de operación en cada proceso (MC. Adrián Méndez Prieto, 2009).

Para seleccionar del método de recuperación química no solo se deben tomar en cuenta la inversión y el costo de operación, requerimientos energéticos también generan un costo y deben ser tomados en cuenta. En la figura 43 se tiene esta comparativa del requerimiento energético de cada uno de los procesos en cal/s.

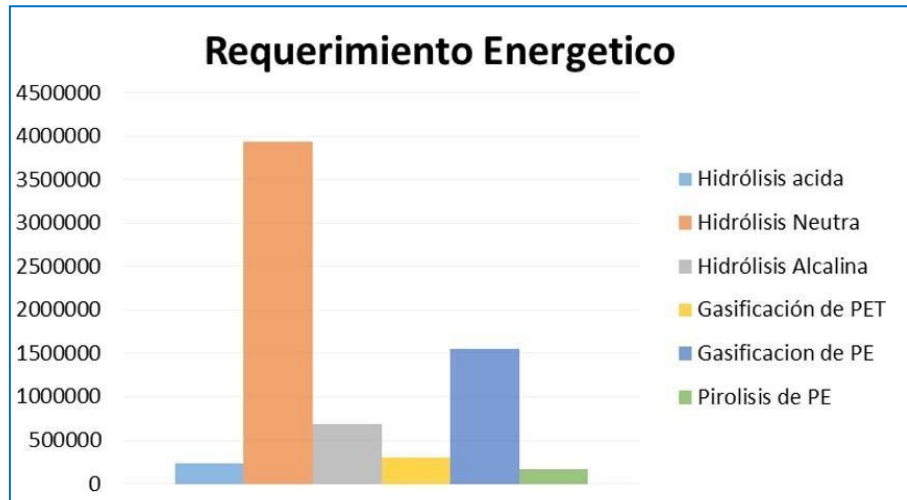


Figura 43: Requerimiento energético de cada uno de los procesos (MC. Adrián MéndezPrieto, 2009).

Podemos concluir que la pirólisis es el mejor proceso para escoger, ya que el costo de recuperación al tener poco costo de operación y bajo requerimiento energético, siendo entonces la pirólisis la opción más viable para la recuperación de polietileno que se propone.

PIRÓLISIS

Los pirólisis de los residuos plásticos, que se trata de un tipo de reciclaje químico del cual se pueden obtener productos como fracciones ligeras de petróleo y gas, lo cual lo hace un proceso rentable. La fracción gaseosa de los productos de pirólisis de plásticos está formada por hidrocarburos de cadena corta (C_1 a C_4), formados en muchos casos por el craqueo de los productos primarios de la descomposición del plástico. Es especialmente significativa en el caso del pirólisis de polietileno (Morales, 2008).

La producción de pirólisis se puede mejorar con la degradación catalítica, donde se usa

un catalizador adecuado para promover la reacción de craqueo. La presencia de un catalizador permite bajar la temperatura y el tiempo de reacción. Sin embargo, en el proceso propuesto no se utilizarán catalizadores.

Se selecciona el proceso de pirólisis ya que aun que tiene el mayor costo de inversión es el que tiene un menor costo en costo de operación y requerimientos energéticos.

SELECCIÓN DEL REACTOR

De acuerdo con la revisión bibliográfica se recaudaron los siguientes datos:

Uso de reactor de lecho fluidizado para la pirólisis de HDPE en un rango de temperatura de 500 – 900 °C, el rendimiento total de gas varió de 5.7 % hasta un máximo de 94.5 % a los 800 °C (J. A. Conesa, 1994).

Pirólisis de HDPE en un reactor de lecho fijo hasta una temperatura final de 700 °C, el rendimiento de cera fue de 79.72 % y de gas 16.77 %, sin dejar residuos sólidos (E. A. Williams, 1997).

Pirólisis catalítico de HDPE en un reactor semi-batch con agitación en un rango de temperatura de 420 a 510 °C, rendimiento máximo de producto condensable del 91.2 % a 450 °C con agitación de 50 rpm, 20 % catalizador/polímero (M. S. Abbas-Abadi, 2013).

Por las características de nuestro proceso mecánico y dado que en la revisión de biografía se tiene un mayor rendimiento en la obtención de gases, se selecciona el reactor tipo Bach. Se escoge al proveedor BESTON para cotizar, en la figura 44 se puede observar una imagen del reactor tipo Bach.



FIGURA 44: Reactor de pirólisis de residuos plástico marca BESTON (BELAIK, 2020).

El reactor Bach es un reactor que nos permitirá tener un control sobre el tiempo del volumen de material procesado, ya que para garantizar que la materia prima no este contaminada debe llevar un proceso de tratamiento de lavado y secado.

Es un reactor que se caracteriza por tener un recipiente de almacenamiento cubierto con una periferia calefactora y en muchos casos un agitador mecánico. Además, este tipo de reactor no posee flujos inertes que ayudan al desplazamiento de volátiles producidos por la reacción, por esta razón se originan reacciones secundarias (aromatizaciones) que influyen en el correcto desempeño del equipo, produciendo elementos no requeridos (P., 2010). Se escoge el modelo BLJ-3 por la capacidad de producción que tiene, en la tabla 13 podemos observar las características del reactor.

TABLA 13: Características del reactor (BELAIK, 2020).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Capacidad diaria	1.5-3Ton

Método de trabajo	Lote
Tamaño del reactor	D1.4m * L5m
Patrón	Horizontal y giratorio
Materiales de calentamiento	Fuel Oil, Gas Natural, GLP, etc
Potencia	16.6kw / h
Solicitud de área de instalación (L*W*H)	20m * * 8m 8m
Peso	18Ton
Presión operacional	Ligera presión positiva
Método de enfriamiento	Refrigeración por agua
Esperanza de vida	5 8-Años

Ventajas de Beston Diseño de plantas de pirólisis de residuos plásticos (BELAIK, 2020):

- Utilizamos la técnica de soldadura automática para mejorar en gran medida la eficiencia de trabajo y garantizar la calidad de la soldadura simultáneamente.
- El sello hidráulico puede detener el fuego mientras elimina el azufre, las impurezas y mantiene limpio el gas de petróleo.
- El termómetro y el manómetro profesionales están configurados para inspeccionar la temperatura y la presión en cualquier momento.
- El sistema de alimentación y el sistema de descarga están sellados para garantizar la seguridad, la higiene del lugar de trabajo y garantizar que no haya pérdida de calor durante el proceso de pirólisis.
- El condensador de tipo tubo se utiliza para ampliar las áreas de condensación a fin de mejorar la eficiencia de trabajo de la planta.
- Tenemos un diseño de seguridad de alto nivel con tecnología 100% anti-quemaduras y tecnología a prueba de explosiones y técnica a prueba de obstrucciones de la válvula de salida.

- En el funcionamiento diario, la sala de gases de escape está cerrada. Cuando la presión es demasiado grande, se puede abrir la sala de gases de escape, por lo que el gas combustible se quemará para reducir la temperatura y la presión del aire del reactor.
- Tenemos varios tipos de equipos de pirólisis para plástico a la venta, como los de tipo lote (también llamados planta de pirólisis a pequeña escala), planta de pirólisis de residuos plásticos semicontinua y totalmente continua. Los clientes pueden elegir libremente según sus necesidades reales.

Los sistemas de pirólisis de 1.5 – 3 Ton con un costo aproximado de inversión capital desde los \$11.2 millones de USD a los \$31.6 millones de USD aproximadamente.

Se realizó la cotización con un reactor tipo Bach horizontal, sin embargo, para la simulación se realizará en un reactor Bach vertical.

SELECCIÓN DE VARIANTES DE OPERACIÓN

TEMPERATURA

Como se revisó en la biografía a temperatura es uno de los parámetros operativos más importantes en el pirólisis, ya que controla la reacción de desintegración de las cadenas de polímeros. En la despolimerización del polietileno aumenta su rendimiento con el aumento de la temperatura, por lo cual se escoge trabajar a una temperatura de 600°C, para optimizar al máximo los productos a obtener.

PRESION Y GAS INERTE

Se realizará la simulación en una atmosfera con un caudal de N_2 de 100 Kg/hr y 1 atm de presión.

FLUJO

Del material almacenado se cargará el reactor, teniendo como resultado una entrada de material de 900 kg de polietileno.

TIEMPO DE RESIDENCIA

La simulación del proceso de realizará con un tiempo de residencia de 1hora.

SIMILACIÓN DE DEGRADACION DE POLIETILENO

PROCESO DE SIMULACIÓN

Se procede a simular el proceso de pirólisis en un reactor Bach, con el fin de resaltar la importancia que tiene una mezcla homogénea de polietileno para la obtención de gases de síntesis, para así erradicar residuos contaminantes. La simulación de pirólisis se realizará en Aspen y el proceso se explica en el diagrama de bloques de la figura 45.

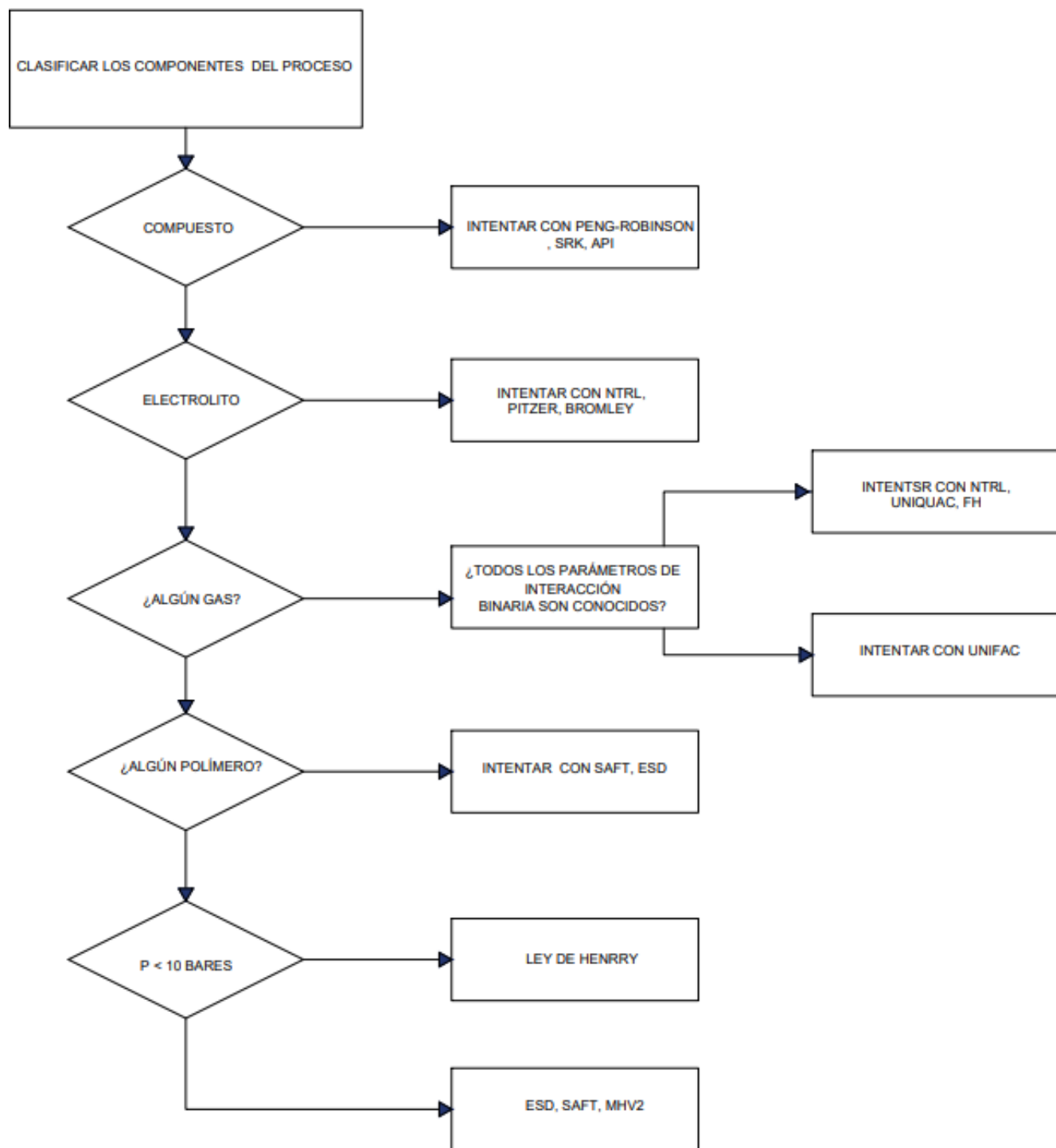
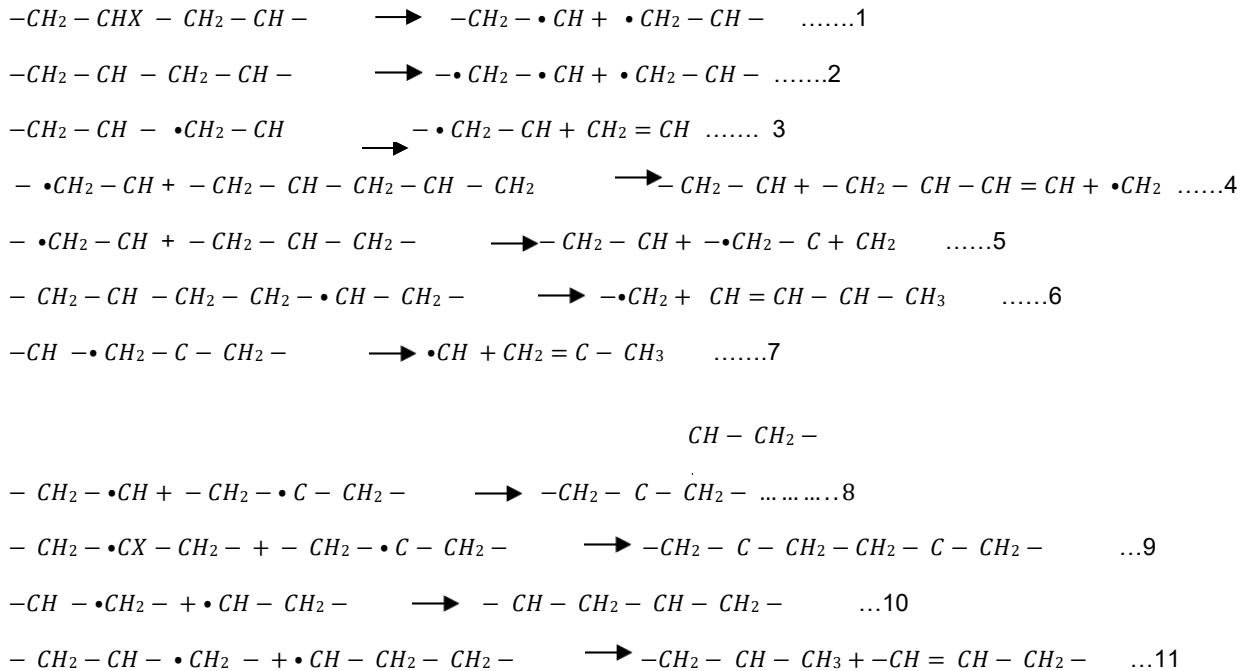


FIGURA 45: Diagrama de bloques aspen de la simulación de pirólisis.

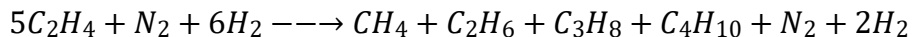
Reacción de pirólisis de polietileno



Mecanismo de degradación térmica de polietileno (Poutsma, 2003).

El mecanismo de degradación térmica del polietileno se complica aún más cuando se tienen en cuenta las reacciones de formación de compuestos aromáticos simples o poli-aromáticos, para lo cual es necesario considerar algunas reacciones secundarias adicionales (Mastral y cols., 2007).

Reacción deseada:



Para poder empezar la simulación del proceso se seleccionaron los componentes de entrada al sistema, tanto los componentes como las condiciones a las cuales entraron.

1.-Se realizo la selección de los componentes que participaron en la reacción, los cuales en nuestro caso de estudio el etileno, metano, etano, propano, butano e hidrogeno.

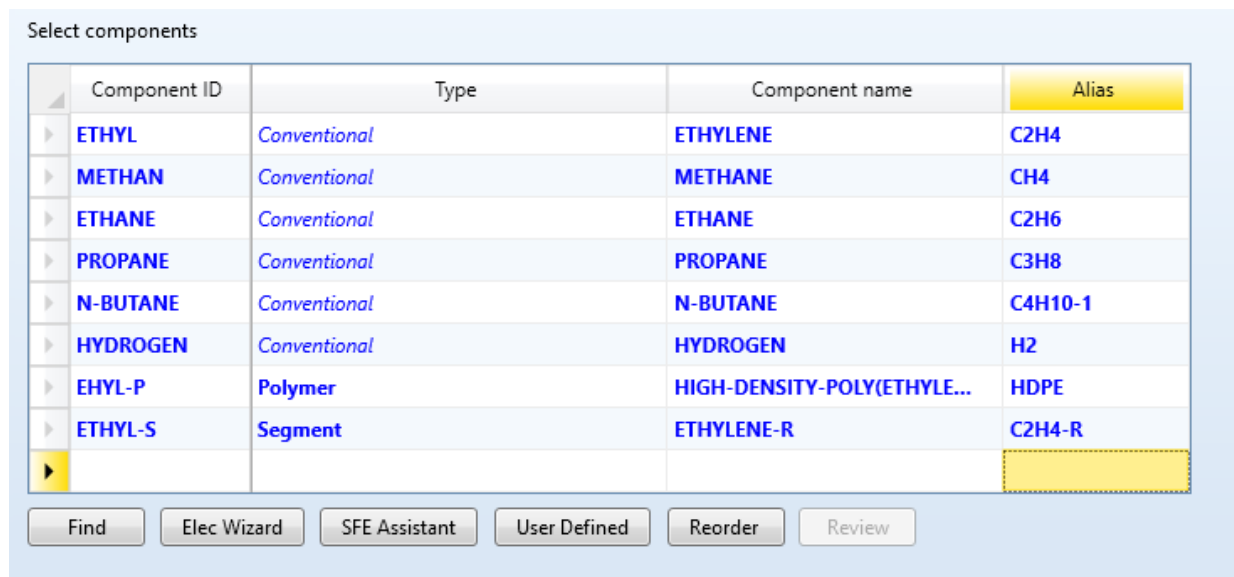


FIGURA 46: Ventana selección componentes de la simulación.

2.- La alimentación de polietileno al reactor tendrá una temperatura de 25°C a 1atm, con un flujo base de entrada de 100 kg/hr con una relación de 90 kg de polietileno y 10 kg de H2 para efectuar la reacción.

Specifications

Flash Type: Temperature Pressure

State variables

Temperature: 25 C

Pressure: 1 atm

Vapor fraction:

Total flow basis: Mass

Total flow rate: 100 kg/hr

Solvent:

Reference Temperature:

Volume flow reference temperature: K

Component concentration reference temperature: K

Composition: Mass-Flow kg/hr

Component	Value
ETHYL-01	60
METHA-01	
ETHAN-01	
PROPA-01	
N-BUT-01	
HYDRO-01	40
Total	100

FIGURA 47: Ventana introducción variables termodinámicas de entrada.

3.- Las condiciones operación con que se realizó la simulación fue a 600°C y 1 atm.

Specifications Products Assign Streams Inerts Restricted Equilibrium PSD Utility Comments

Calculation option

Calculate phase equilibrium and chemical equilibrium

Operating conditions

Pressure: 1 atm

Temperature: 600 C

Heat Duty: cal/sec

Phases

Maximum number of fluid phases:

Maximum number of solid solution phases: 0

☒ Include vapor phase

☐ Merge all CISOLID species into the first CISOLID substream

FIGURA 48: Especificaciones del módulo.

4.- Después metimos la información exacta acerca de la estequiometría o cinética. La salida de la reacción se define con base en el rendimiento.

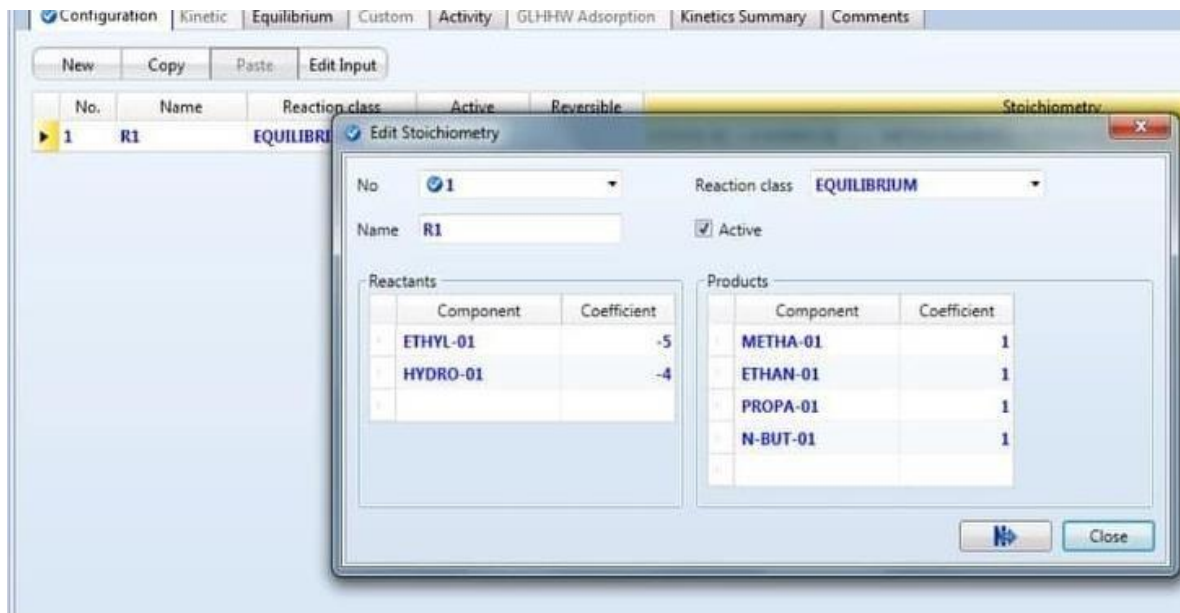


Figura 49: Selección de estequiometría o cinética.

5.- Cuando corrimos el proceso en el simulador se obtuvieron los siguientes resultados:

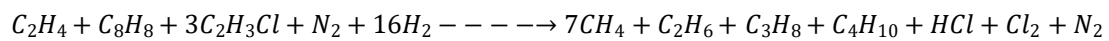
TABLA 14: Resultados de la simulación sin contaminantes.

Flujo	Kg/hr
Etileno	6.36E-05
Metano	68.62
Etano	0.001788
Propano	1.71522E-07
N-butano	1.44894E-11
Hidrogeno	31.37

En la simulación se observó que el proceso es viable ya que reacciona y se obtienen biocombustibles como el metano y butano en su mayor proporción.

SIMULACIÓN DE PIRÓLISIS CON CONTAMINANTES

Como vimos en la simulación anterior, el polietileno reacciona dependiendo de las condiciones a las que se lleve a cabo la pirólisis, por lo cual para la simulación donde tomaremos como agentes contaminantes el cloruro de vinilo (C_2H_3Cl) y el estireno (C_8H_8) se plantea la siguiente ecuación:



Donde podemos visualizar los residuos clorados, los cuales son altamente tóxicos y deben ser tratados como residuos peligrosos.

Simulación

1.- Se llevo a cabo la simulación en un reactor Bach.

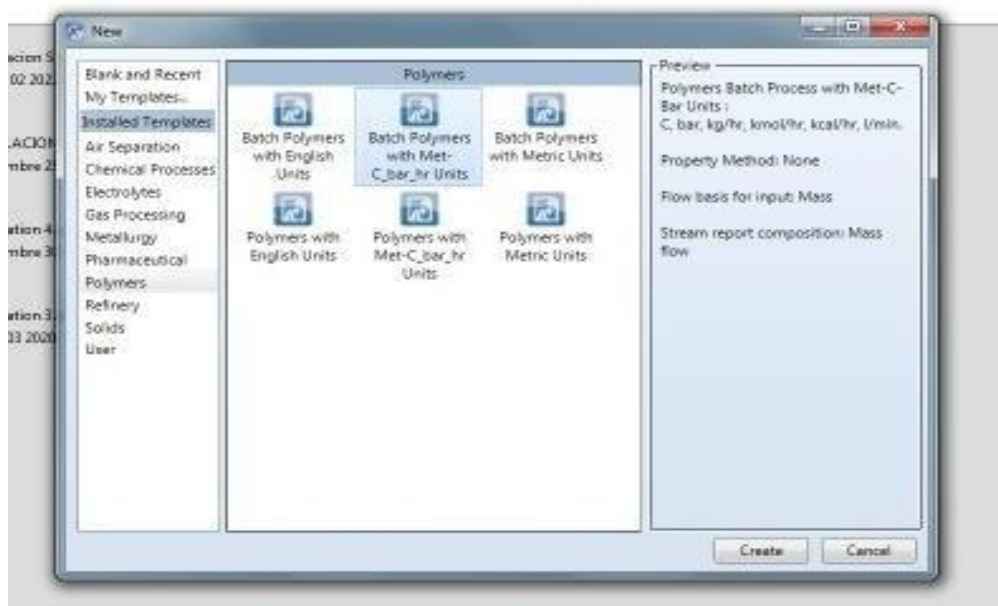


FIGURA 50: Selección del método.

2.- Se seleccionan los componentes involucrados en la reacción, donde los reactivos se clasifican en tipo convencional, poliméricos y segmento (el cual nos indica que es el monómero del polímero que nos interesa sintetizar). El etileno se indicará como un agente polimérico, segmento y como convencional ya que es un agente iniciador.

Components - Specifications				
Select components				
Component ID	Type	Component name	Alias	
LOW-D-01	Polymer	ETHYLENE	C2H4	
STYRE-01	Polymer	STYRENE	C8H8	
VINYL-01	Polymer	VINYL-CHLORIDE	C2H3CL	
NITRO-01	Conventional	NITROGEN	N2	
HYDRO-01	Conventional	HYDROGEN	H2	
METHA-01	Conventional	METHANE	CH4	
ETHAN-01	Conventional	ETHANE	C2H6	
PROPA-01	Conventional	PROPANE	C3H8	
N-BUT-01	Conventional	N-BUTANE	C4H10-1	
HYDRO-02	Conventional	HYDROGEN-CHLORIDE	HCL	
CHLOR-01	Conventional	CHLORINE	CL2	

FIGURA 51: Selección de componentes

3.- Condiciones de entrada al reactor. Por la complejidad del mecanismo de reacción, la simulación se realiza con una base de cálculo de 1000 kg/ hr, tomando en consideración la estequiometria la estequiometria deseada para la simulación. Se toman como gases inertes el H_2 y el N_2 para reaccionar con la mezcla de polímeros (poliestireno (C_8H_8), polietileno (C_2H_4) y policloruro de vinilo (C_2H_3Cl)).

Component	Value
LOW-D-01	1
STYRE-01	1
VINYL-01	3
NITRO-01	1
HYDRO-01	16
METHA-01	
ETHAN-01	
Total	22

FIGURA 52: Selección de condiciones de entrada.

5.- Condiciones de reacción del reactor se mantuvieron exactas a la simulación sin contaminantes (600°C y 1 atm) para poder comparar los resultados.

FIGURA 53: Selección de condiciones del reactor.

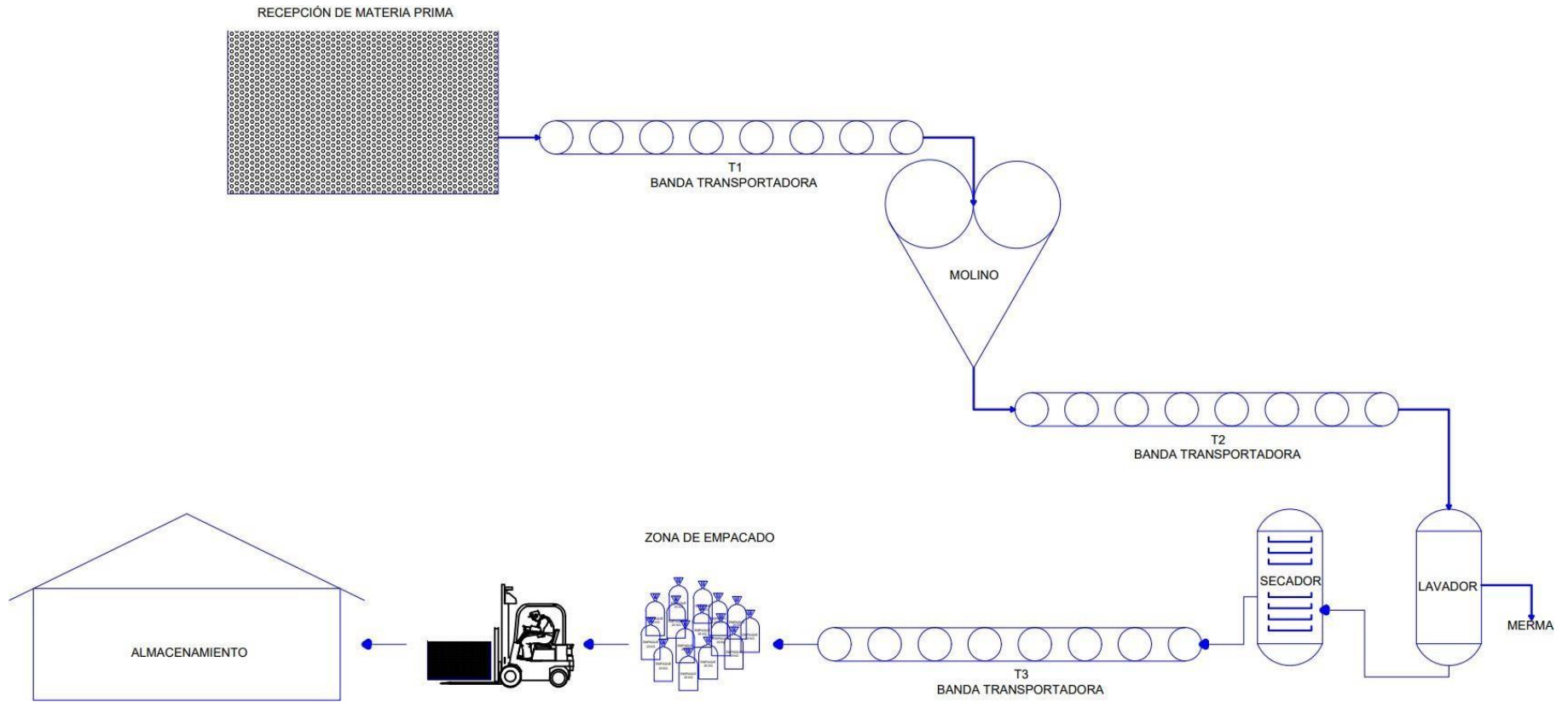
6.-Salida del reactor después de la simulación se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 15: Resultados de la simulación con contaminantes.

FLUJO	PM	kmol/hr	kg/hr
Etileno	28.05000	0.03803126	1.066776928
Estireno	104.15000	1.62494144	169.2376514
Vinilo	62.50000	2.93E-05	0.001830445
Nitrógeno	28.00000	2.6317978	73.69033846
Hidrogeno	2.00000	1.18898166	2.377963323
Metano	16.04000	28.9610844	464.5357944
Etano	30.07000	0.03570098	1.073528422
Propano	44.09700	0.00020703	0.009129231
N.butano	58.12000	1.18E-06	6.83819E-05
Ácido clorhídrico	36.46000	7.89536412	287.8649758
Cloro	70.90600	5.74E-11	4.06734E-09
TOTAL		42.3761392	999.9

Los resultados obtenidos en kg/hr la simulación respetan la base de cálculo que se utilizó y nos muestra que al realizar la pirólisis en mezcla se genera derivados de Cl_2 , hidrogeno con pocos gases de síntesis. La pirólisis en mezcla no presenta eficiencia en generación de gases y genera contaminantes que necesitan ser tratados como residuos peligrosos, por lo cual es importante realizar un lavado que permita separar de manera correcta el polietileno.

DIAGRAMA DE PROCESO DE RECUPERACIÓN MECÁNICA



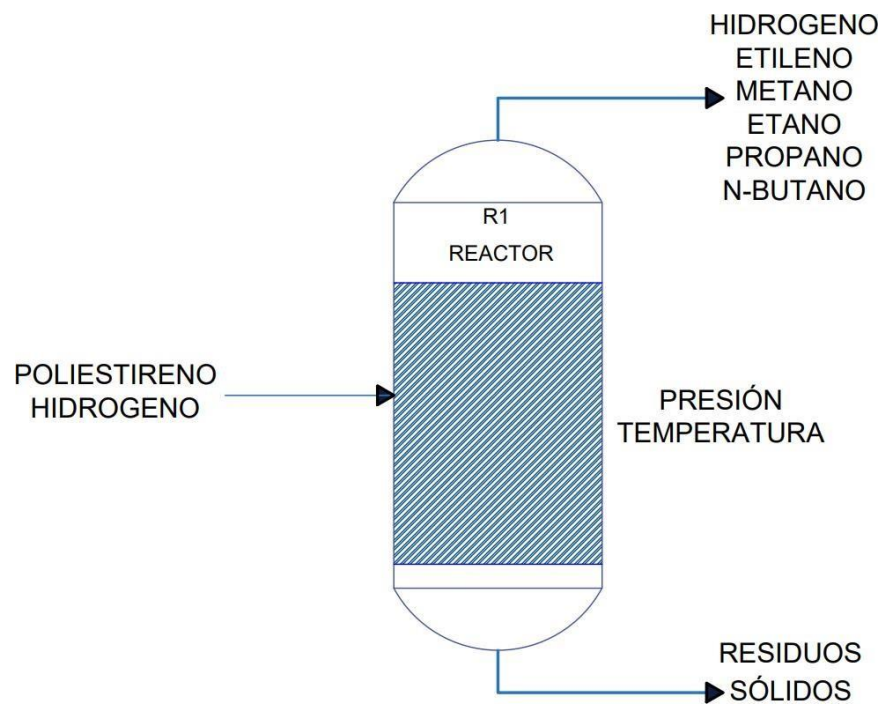
Descripción del proceso

Como primer proceso se plantea la recuperación mecánica, la cual se describe a continuación:

- Proceso mecánico propuesto como primera etapa propone la recepción de materia prima preseleccionada, la cual será transportada por medio de una banda vertical que va dirigido a la tolva del molino.
- La capacidad del molino tiene una capacidad de producción de hasta 15 ton/hora y se obtendrán hojuelas de 5 a 6 mm.
- El material molido se transporta por medio de una banda hacia un sistema de lavado simple con agitación por 30 minutos que facilitara la purificación del material, separando por diferencia de densidades los contaminantes.
- Al termino de este proceso el material será llevado al secado por medio de un sistema de aire caliente que será en un rango de 70 a hasta 110°C, con flujo de aire de secado = $2800 \times \frac{2}{3}$ cfm.
- Una vez seco el producto se almacenar para su posterior uso.

Lista de equipamiento				
Texto mostrado	Descripción	Fabricante	Material	Modelo
LAVADO	Capacidad 1,279L, 114cm de diámetro por 122cm de altura, raspadores de 5HP con velocidad fija de 29RPM, control con selectores para encendido del motor con botón de paro y emergencia	Inoximexico	acero inoxidable	TQA1000 LNPTVAP
Lavado y secado	Capacidad de 700 kg, temperatura de secado 50 a 80° C, Flujo de aire de secado = 2800*2/3 cfm	Saigh	acero inoxidable	Wensui 50
Molino	motor de 30 HP, potencia 22 KW,BOCA300x 600 MM, DIMENSIONES 1000x1160x1450 MM, PESO 1100 KGS	ASIAN MACHINEY	acero inoxidable	VMPC-600FILM
Montacargas	Capacidad de 3.5 ton, gasolina/gas LP	WomKlift	Llantas Neumáticas. Mástil dúplex de 3000mm. Horquilla de 92mm.	MXWKT-001-001
T1 Banda transportadora	Ancho 12 ft , Capacidad de Carga (lb.)255, Energía1/2 hp, Velocidad de la BandaFijo a 60 ppm	Grainger	Acero	Grainger: 42X872
T2 Banda transportadora	Ancho 12 ft , Capacidad de Carga (lb.)255, Energía1/2 hp, Velocidad de la BandaFijo a 60 ppm	Grainger	Acero	Grainger: 42X872
T3 Banda transportadora	Ancho 12 ft , Capacidad de Carga (lb.)255, Energía1/2 hp, Velocidad de la BandaFijo a 60 ppm	Grainger	Acero	Grainger: 42X872

DIAGRAMA DE PROCESO DE RECUPERACIÓN QUÍMICA



Lista de equipamiento

Texto mostrado	Condiciones	Fabricante	Material	Modelo
R 1 Reactor	T = 600 °C, P = 1 atm, flujo de entrada 100 kg/hra	BESTON	Acero inoxidable	BLJ-3

La segunda etapa se propone una recuperación química alimentando polietileno sin contaminantes con H_2 como gas inerte reactor tipo Bach, con condiciones de operación de 600°C temperatura a 1 atm y un flujo de 100 kg/hr, obteniendo como productos etileno, metano, etano, propano, N-butano, hidrogeno y residuos sólidos.

EVALUACIÓN AMBIENTAL

Ventajas

Las ventajas del pirólisis se dividen en cuestiones ambientales, operacionales y financieras, de las cuales se encuentran:

- Notable reducción del volumen de desecho (< 50 – 90 %).
- Generación de productos gaseosos, líquidos y sólidos a partir de desecho.
- No se requiere limpieza de gases de combustión.
- Obtención de combustible almacenable y transportable.
- Problemática ambiental de los rellenos sanitarios y la emisión de gases de efecto invernadero es reducida.
- Es un proceso deseable para la obtención de energía a partir de residuos sólidos urbanos.
- Los productos son fácilmente comerciables.
- Posibilita una generación más eficiente de energía eléctrica.

- La materia prima no requiere algún pretratamiento especial.
- Flexibilidad del tipo de material a procesar y condiciones de operación.
- Productos con bajo contenido de azufre y gases NOx.
- Proceso configurable acorde a los resultados deseados.
- Obtención de materia prima para la fabricación de químicos.

Desventajas:

- La viscosidad del líquido pirolítico dificulta su transportación y combustión.
- Elevados consumos de energía.
- Tecnología y mantenimiento costoso.
- Debido a la baja conductividad térmica del plástico y que es un proceso endotérmico, se requiere más temperatura para llevar a cabo la descomposición del material (mayor energía requerida para que el proceso tenga lugar).
- Requiere el secado del material previo a su procesamiento.

CONCLUSIONES

Al realizar la revisión bibliográfica correspondiente se logró entender la importancia del reciclado, ya que son materiales pueden extender su vida útil proporcionando materias primas en su recuperación, así mismo se hace relevancia en la importancia de

separar de manera correcta los materiales para evitar producir contaminantes al momento de recuperarlos de manera química.

Se analizaron los diferentes tipos de reciclaje mecánico y químico para lograr por un método de recuperación, al término de la investigación de logro llegar a las siguientes conclusiones:

- Se propuso un método de recuperación mecánica donde se logró un aumento del 0.012 % de recuperación de polietileno anual.
- Escogiendo el método de pirólisis al para la recuperación de polímeros, ya que es el que ofrece un mayor rendimiento en obtención de gases combustibles, pocos solidos contaminantes.
- La comparativa de las simulaciones se realizó de forma efectiva para confirmar que será más efectivo realizar un lavado que garantice la eliminación de contaminantes para una mayor obtención metano en mayor proporción.
- Entre las ventajas más notables fue la reducción del volumen de RSU con una generación de productos gaseosos, líquidos y sólidos de valor económico. La materia prima no requiere algún pretratamiento especial. Lo más importante de que en el proceso de pirólisis se obtienen productos con bajo contenido de azufre y gases NOx.

RECOMENDACIONES:

En el proceso de recuperación mecánica se recomienda hacer un análisis de un proceso continuo, para obtener una mejor eficiencia en el proceso, así como poder omitir el proceso de lavado para reducir costos.

Se recomienda realizar simulaciones del proceso de pirólisis a diferentes temperaturas para encontrar las condiciones óptimas para aumentar la producción de gases combustibles. Así mismo modificar el proceso de pirólisis para aprovechar las corrientes de calor que se generan en el intercambiador de calor, para poder hacer una simulación bajo nuevas condiciones y optimizar el procedimiento.

También se encontraron que existen catalizadores como zeolitas, cascara de nuez entre otros, que ayudan a que la pirólisis sea más efectiva. Se recomienda abundar sobre el tema y proponer el método de recuperación con un catalizador.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliografía

A. K. Panda, R. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol 14 no 1 , 233-248.

Al-, H. K. (2011). Pyrolysis defined pyrolysis in History Research & Commercialization of Pyrolysis. *Phys. Procedia* vol 66 no 12, 4952 - 5001.

Alegría, A. (13 de enero de 2022). *En 2021, México recicló más de 1 millón de toneladas de plástico: Anipac.* Obtenido de La jornada : <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/01/13/economia/en-2021-mexico-reciclo-mas-de-1-millon-de-toneladas-de-plastico-anpac/>

Alethia Vázquez Morillas, R. M. (octubre de 2016). *El reciclaje de los plásticos* . Obtenido

- de Univesidad Autonoma Metropolitana : http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf
- Alvarez, L. L. (Agosto de 2009). *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA*. Obtenido de MÉTODOS PARA LA SEPARACIÓN DEL PVC: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/402/1/Lidia%20Lara%20Alvarez.pdf>
- AMBIENTE, S. D. (2013). *NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011*. Estados Unidos Mexicanos.: DIARIO OFICIAL.
- Andres Flores Montalvo, F. O. (2020). *Revisión de las opciones disponibles y su aplicabilidad en México*. Obtenido de WRI México: <https://wrimexico.org/sites/default/files/Hojas%20Factuales%20Publicaci%C3%B3n.pdf>
- Anuar Sharuddin, S. D. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. . *Energy Conversion and Management*, 308–326.
- ANUIES, A. N. (18 de JULIO de 2021). Obtenido de La pandemia cambió los patrones de consumo y la cantidad de basura plástica: http://www.anui.es.mx/noticias_ies/la-pandemia-cambi-los-patrones-de-consumo-y-la-cantidad-de-basura
- Arévalo, P. F. (25 de Enero de 2021). *Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad*. Obtenido de South Sustainability: <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/733-Article%20Text-2406-2-10-20210217.pdf>
- ARPET, A. C. (20 de SEPTIEMBRE de 2017). *Reciclaje de plásticos*. Obtenido de www.arpet.org/docs/Reciclaje-de-plasticos.doc
- Asian Machiney USA, I. (2022). *ASIAN MACHINEY USA , INC*. Obtenido de Molinos: <https://asianmachineryusa.com/Reciclado-de-plasticos/Molinos/Para-Peliculas-o-Fundas/VMPC-600FILM>

- Barajas, F. L. (26 de Marzo de 2014). *Centro de investigaciones en química aplicada* .
Obtenido de Programa de maestría en Tecnológico de polímeros :
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/21/1/Tesis%20MTP%20Fabiola%20Lopez%20Barajas%20May%2021%202014.pdf>
- BELAIK, B. G. (2020). *BESTON GRUP* . Obtenido de BESTON GRUP :
<https://www.bestongroup.com/es/waste-plastic-pyrolysis-plant/>
- Bertolotti, B. C. (2005). Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno).
Química, 13-19.
- Brown, L. (octubre de 2018). *Fast pyrolysis of fibre waste contaminated with plastic for use as fuel products*. . Obtenido de Journal of Analytical and Applied Pyrolysis:
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.007>
- Caleño, F. D. (28 de Abril de 2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente* . Obtenido de Universidad Autónoma de Occidente :
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf;jsessionid=B2019A64C999A86D9060ED2E37B6F24C?sequence=5>
- Cancino, A. R. (2011). *PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4489/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cárdenas, C. P. (2006). Remoción de nutrientes en un reactor discontinuo secuencial. .
Interciencia 31, 787 - 793.

Carlos, R. F. (2004). *Despolimerización de Pet como alternativa de reciclado* . Medellín Colombia : Universidad EAFIT.

Casas, T. B. (2014). *División de Ciencias Básicas e Ingeniería*. Obtenido de Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de una Planta de Pirolisis para la Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal: http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Estudio-de-Factibilidad-Tcnica-y-Econmica-de-una-Planta-de-Pirolisis.pdf

CASAS, T. B. (2014). *UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA* . Obtenido de División de Ciencias Básicas e Ingeniería: http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Estudio-de-Factibilidad-Tcnica-y-Econmica-de-una-Planta-de-Pirolisis.pdf

Castaño, A. O. (2018). *Evaluacion de metodologias de hidrolisis del pet para su aprovechamiento* . Colombia : Manizales.

Castillo, G. N. (2018). *Sinntesis y caracterizacion cristalografica de (Cu, Zn)-MoFs y acido tereftalico*. Bucaramanga .

Cintora, L. A. (2021). *Programa de Gestion Integrta de Residuos Para la Ciudad De México*. Obtenido de Sedema PGIR 2021-2025: https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf

Conde, O. (2013). *Presente Futuro de la Industriadel Plástico en México*. México: Revista con Visión Global.

Copyright. (2018). *Inoximexico*. Obtenido de Tanque de Agitación: <https://www.inoximexico.com/producto/662/tanque-de-agitaci-n-de-1000-nominales-calentamiento-a-vapor-ss304?gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuXPKjzR1Jp9OfzgYgopvRaOdoW>

- D. S. Achilias, C. R. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP),". *J. Hazard. Mater.*, vol. 149, 536 - 542.
- D.A. Wahab, A. H. (2006). *Development of a Prototipe Automated Sorting Systemfor Plastic Recycling*. Malaysia: American Journal of Applied Science.
- Daza, P. C. (2019). *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS TECNOLOGÍA MECÁNICA*. Obtenido de DISEÑO DE UNA MÁQUINA LAVADORA Y SECADORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO SEDE TECNOLOGÍA MECÁNICA UD.: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/27588/BetancourtDazaPaulaCamila2020.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- E. A. Williams, P. T. (1997). The pyrolysis of individual plastics and a plastic mixture in a fixed bed reactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 70, n.o 1, pp. 9-20,.
- ECOCE. (2017). *plan nacional privado colectivo de manejo de residuos de envases psts- consumo de PET, PEAD, aluminio, y otros* . México: ECOCE.
- ECOSE, G. d. (24 de septiembre de 2019). *Portal ambiental*. Obtenido de Ecoce y Gobierno de la CdMx duplicarán el reciclaje de residuos sólidos: <https://www.portalambiental.com.mx/empresas/20190924/ecoce-y-gobierno-de-la-cdmx-duplicaran-el-reciclaje-de-residuos-solidos>
- Empresarial), E. A. (Noviembre de 2019). *Ecología y Compromiso Empresarial*. Obtenido de https://www.ecoce.mx/assets/pdf/plan_nacional/PLAN_NACIONAL_PRIVADO_COLECTIVO_DE_MANEJO_DE_RESIDUIS_DE_ENVASES_Y_EMPAQUES_2019_SEMARNAT.pdf

Espinoza Merchán, J. E. (Julio de 2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7014>

Europe, P. (2019). *Plásticos – Situación en 2019*. Obtenido de Plastics Europe : https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/Plastics_the_facts-Mar2019-esp.pdf

F. Paradelo, F. P. (2009). Study of the copyrolysis of biomass and plastic wastes. *Clean Technol Environ* , 115-122.

Fantoni, A. L. (2003). *Envase y embalaje* . Madrid : ESIC EDITORIAL .

Ferrer, J. A. (enero de 1996). *QUIMICA, UNIVERSIDAD DE ALCANTE FACULTAD DE CIENCIAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA*. Obtenido de <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio.pdf>

Ferretería, S. F. (agosto de febrero de 2011). Obtenido de El plastico, historia de plastico y sus tipos de moldeo: <http://www.sysfix.es/el-plastico-su-historia-sus-tipos-y-su-moldeo/>

FRANK, K. W. (1992). MONOMER RECOVERY OF POLY (METHYL METACRYLATE). *PMMA*, 19-18.

Fussstetter, F. (30 de Marzo de 2021). *Noticias ONU Mirada global Historias humanas*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490302#:~:text=Si%20no%20se%20toman%20medidas,zonas%20m%C3%A1s%20vulnerables%20del%20planeta.>

Graf. (2022). *Graf*. Obtenido de <https://www.graf-agua.com/separadores/separadores-de-hidrocarburos/separador-de-hidrocarburos-diamant/separador-de-hidrocarburos-diamant-clase-i.html>

Hasegawa, M. F. (1974). Gasification of solid waste in a fluidized bed circulation sand. *Conservation and recycling* , 143-153.

Heredia, J. G. (20 de Mayo de 2021). *Polietileno, el material más reciclado en México: Anipac*. Obtenido de Mundo de Negocios: [https://emprefinanzas.com.mx/2021/05/20/polietileno-el-material-mas-reciclado-en-mexico-anipac/#:~:text=El%20polietileno%20es%20lo%20que,Industrias%20del%20PI%C3%A1stico%20\(Anipac\).](https://emprefinanzas.com.mx/2021/05/20/polietileno-el-material-mas-reciclado-en-mexico-anipac/#:~:text=El%20polietileno%20es%20lo%20que,Industrias%20del%20PI%C3%A1stico%20(Anipac).)

Hernández, G. (2013). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias*. Obtenido de Diseño y construcción de un equipo triturador de botellas plásticas: <file:///C:/Users/BPM-L-2/Downloads/Documento%20Final%20Trabajo%20de%20Grado.pdf>

Holmes, K. (2014). DELIVERING IN THE POTENTIAL SUSTAINABILITY OF PLASTICS. *PLAST ENG*, 26-28.

industry, D. (2017). *Secador por aire seco*. Obtenido de Direct industry: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/secador-aire-seco-85557.html>

Interempresas. (enero de 01 de 1999). *Cuando el caucho se convirtió en goma*. Obtenido de interempresa, canales sectoriales: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6255-Cuando-el-caucho-se-convirtio-en-goma.html>

J Aguado, D. P. (2007). Catalytic activity of zeolitic and mesostructures catalysts in the cracking of pure and waste polyolefins . *Pyrolysis* vol 78, 153- 161.

J. A. Conesa, R. F. (1994). Pyrolysis of Polyethylene. *Energy & Fuels*, vol. 8, n.o 6, pp. 1238-1246,.

J. H. Song, R. J. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional

- plastics. *Philos Trans. R. Soc. B. Biol Sci.* vol 364 no 1526, 2127 - -2139.
- Jensen, N. B. (21 de octubre de 2021). *ONU programa para el medio ambiente* .
Obtenido de Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente:
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- José Armando Castro Medina, G. Y. (Diciembre de 2011). *“Diseño de una banda transportadora semiautomática para la fabricación de tanques de combustible de vehículos de carga”*. Obtenido de INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA:
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/10563/1/100.pdf>
- José Emmanuel Medina García, C. E. (2011). *Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de* . Obtenido de Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima :
[http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20\(PET\).pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20(PET).pdf)
- Juan Conesa, F. (Enero de 1996). *Universidad de Alicante Facultad de Ciencias Departamentales de Ingenieria Quimica*. Obtenido de Estudio de la pirolisis de residuos plasticos de polietileno y neumaticos usados:
[file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio%20(1).pdf)
- Karla Ivonne Zamudio Lara, L. A. (2013). *Obtencion de bis-hidroxi etilen terelatalato (BRET) por el metodo de glicolisis a partir del PET Post-consumo* . México D.F.: Escuela Superior de Ingenieria Quimica e Industrias Extractivas IPN.
- Kim Ragaert, L. D. (2017). Mechanical and chemichal recycling of solid plastic waste. *Waste Manag* vol 69, 24-58.

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Pontificia Universidad Católica de Perú. *Revista de Química PUCP* vol 26, 37 - 40.

Laguna, O. (1992). Reciclado. *Revista de plasticos modernos*, 427, 65-67.

M. S. Abbas-Abadi, M. N. (2013). Evaluation of pyrolysis product of virgin high density polyethylene degradation using different process parameters in a stirred reactor. *Fuel Processing Technology*, vol. 109, pp. 90-95.

M. Sarker, A. K. (2011). Waste Polyethylene Terephthalate Conversion into Liquid Fuel . *Fundam Renew Energy* vol 1 , 1-5.

Manzur, D. V. (mayo de 2020). *Diasnostico básico para la gestion integral de los residuos* . Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

Mariano. (Julio de 2011). Obtenido de “Reciclado Químico del PET”: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html>

Mariano. (Mayo de 2011). Obtenido de Proceso de reciclaje de PET: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html>

Martin, R. (14 de julio de 2020). *rosa envases*. Obtenido de Los códigos de identificación de los plásticos: <https://rosaenvases.com/blog/codigos-identificacion-plasticos/>

Martínez, N. J. (31 de enero de 2021). *www.dgcs.unam.mx*. Obtenido de Boletín UNAM-DGCS-080: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_080.html

Mastellone, M. (1999). *Thermal treatments of plastic wastes by means of fluidized bed reactors*. Italy : Second University of Naples.

- MC. Adrián Méndez Prieto, I. R. (2009). *Cómo separar los plásticos para su reciclado*. Obtenido de Plastics Technology México : <https://www.pt-mexico.com/articulos/como-separar-los-plasticos-para-su-reciclado>
- Mendoza, D. F. (Junio de 2015). *Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. Obtenido de Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS: <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/105898/2/Rodr%C3%ADguez%20Mendoza%2C%20Fayna.pdf>
- Mexpolimeros. (2011). *Mexpolimeros*. Obtenido de Proceso de molienda: <https://www.mexpolimeros.com/proceso%20de%20molienda.html>
- Millan, T. B. (2014). *Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de una Planta de Pirolisis*. Obtenido de UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA: http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Estudio-de-Factibilidad-Tcnica-y-Econmica-de-una-Planta-de-Pirolisis.pdf
- Miranda, C. H. (2018). Modelos mas utilizados de reciclaje y reutilizacion de productos plasticos y estrategias de recuperacion mas utilizadas en colombia . *Universidad Ncional Abierta y a Distancia, UNAD no 1* , 43.
- Noguera, B. (08 de Mayo de 2020). *Pirólisis para generar energía eléctrica*. Obtenido de IQR Ingenieria Quimica : <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/05/pirolisis-energia-electrica.html>
- Ordaz, Y. (27 de Agosto de 2021). *MILENIO*. Obtenido de <https://www.milenio.com/negocios/consumo-resinas-mexico-alcanzo-6-millones-toneladas-2020>
- Oscar Chapa Cordova, E. M. (2001). *DISEÑO DE EQUIPO PARA MOLIENDA Y LAVADO DE PET (POLIETILENO TEREFTALATO)*. Obtenido de ACADEMIA:

https://www.academia.edu/16029923/DISE%C3%91O_DE_EQUIPO_PARA_MOLIENDA_Y_LAVADO_DE_PET_POLIETILENO_TEREFTALATO

Otto Fernando, B. S.-A.-H.-M. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plasticos fabricados a partir de:PP, PE y PS. *polo del conocimiento*, 394-425.

P., B. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. S.I. sn ISBN 9780123749888.

Packsys. (12 de Enero de 2012). *Breve Historia del Polietileno*. Obtenido de packsys academic: <http://www.packsys.com/blog/breve-historia-del-polietileno/>

PÉREZ, L. M. (NOVIEMBRE de 2012). *ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREFTALATO*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2514/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PGIR. (2021-2025). *Programa de Gestion Integral de Residuos para la Ciudad de México*. Obtenido de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf

plástico, T. d. (2018). *Tecnología del plástico*. Obtenido de SERIE HVT DE SECADORAS CENTRÍFUGAS CON AHORRO ENERGÉTICO: <https://www.plastico.com/temas/Serie-HVT-de-secadoras-centrifugas-con-ahorro-energetico+124288>

plasticos, M. p. (2001). *Maquinaria para plastico*. Obtenido de <https://www.maquinariaparaplastico.com/linea-de-lavado-y-secado-de-plastico>

Prieto, M. A. (01 de Agosto de 2020). *Plastic Technology México*. Obtenido de Reciclado químico: una alternativa de valor dentro de la economía circular de los plásticos: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-alternativa-de-valor->

dentro-de-la-economia-circular-de-los-plasticos

Prieto, M. A. (01 de Mayo de 2021). Obtenido de Buenas prácticas en el reciclado de contenedores de PEAD plastics technology: <https://www.pt-mexico.com/articulos/buenas-practicas-en-el-reciclado-de-contenedores-de-pead>

PROFEPA. (05 de SEPTIEMBRE de 2016). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Obtenido de PROFEPA: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914#:~:text=Tiene%20por%20objeto%20garantizar%20el,la%20contaminaci%C3%B3n%20de%20sitios%20con>

Ramirez, A. N. (2019). chemical degradation of poly(ethylene terephthalate). *Revista Colombiana de Quimica*,, 321-331. Obtenido de chemical degradation of poly(ethylene terephthalate) degradação: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/20354/29309>

Rezagos, S. y. (marzo de 2020). *Reciclaje de plástico*. Obtenido de Composición, clasificación y procesos de reciclado.: <https://www.rezagos.com/reciclado-de-plastico.html>

Roye, S.-J. (01 de Agosto de 2018). *PLOS ONE*. Obtenido de Production of methane and ethylene from plastic in the environment: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0200574>

S., G. (1999). Que hacer con los residuos plasticos. *dIFERENTES ALTERNATIVAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA*, 211-219.

S.M. AL-Salem, P. L. (2013). POLYMER FILM PACKAGING FOR DOOF: AN ENVIRONMENTAL ASSESSMENT. *RESOUR CONSER RECYCL*, 74-80.

Saigh, D. R. (Julio de 2005). *Tecnologia del plastico* . Obtenido de Opciones de secado :

<https://www.plastico.com/temas/Que-opciones-hay-para-secar-plasticos+3041537?pagina=2>

Salto, Z. A. (2013). *Gasificación Térmica y Catalítica de residuos Sólidos de PET*. Ecuador: Postgrado de Química. Universidad Central de Ecuador .

Santillan, M. A. (febrero de 2019). *Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*. Obtenido de Division de estudios superiores de posgrado : http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/5737/FIQ-D-2019-0214.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Suarez, M. (06 de Julio de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de Reciclado químico de PET: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html>

Tarragona, R. V. (1991). Aprendizaje de los productos químicos, usos y aplicaciones . En u. departamento de ingeniería química, *Loa plasticos en nuestra sociedad* (págs. 53-55). BARCELONA : REVERTE SA .

Territorial, M. d. (2005). Decreto 0838 de 2005. 45862 no 0838, p 17.

Torres Velazquez, A. B. (2019). *Biblioteca Digital - Dirección de Sistemas de Informática y Comunicación*. Obtenido de Modelamiento y simulación del proceso de pirólisis de polietileno para la obtención de diésel: <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/pirolisis%20sim%201.pdf>

Tranter. (2022). *Tranter*. Obtenido de <https://www.tranter.com/es/reduce-fuel-and-maintenance-costs-with-plate-heat-exchangers/trante>

Vargas, F. (1994). Reciclado químico de plasticos . *ingeniería química* , 153-159.

VARGAS-SANTILLÁN, A. †.-G.-N. (2019). Análisis Tecno-Económico de Gasificación de Polietileno, caso en México. *Revista de Tecnologías en Procesos Industriales*, 1-

7.

Velasco, A. R. (2011). *UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO*. Obtenido de PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4489/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

W.L., H. (1984). *Polymer degradation an stabilization* . berlin: Ssprinter.

Williams Ramos, I. V. (uly 2019). 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”, 24-26 July 2019, Jamaica. 1 Pirólisis Catalítica de Residuos de Polipropileno para I. *17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*:, 24-26 .

Williams, P. (1994). Pollutans from incinerati3n: An overview. *In: Waste Incineration. Royal Society of chemistry*,, 27 - 52.

ANEXOS

NORMATIVA

La norma oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 establece los criterios para

clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo, para poder aprovechar los recursos al máximo y reducir los residuos sólidos urbanos con la aplicación de los planes de manejo para los residuos de manejo especial.

Una de las principales contribuciones que se persigue con la presente Norma es el de controlar y reducir significativamente cada una de las problemáticas ambientales y sociales, mediante la elaboración, desarrollo y aplicación de los Planes de Manejo para los Residuos de Manejo Especial.

La siguiente lista de materiales al transcurrir su vida útil requieren de un manejo específico ya que generan una cantidad mayor a 10 toneladas por residuo al año:

- Aceite vegetal usado.
- Neumáticos de desecho.
- Envases y embalajes de tereftalato de polietileno (PET)
- Polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS)
- Policarbonato (PC) (AMBIENTE, 2013).

Actualmente, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) lleva a cabo estudios cuyo objetivo es el establecimiento de metodologías que permitan la validación para definir indicadores de generación de residuos en México. En el país cada año se generan alrededor de 40 millones de toneladas de residuos. Para los residuos sólidos urbanos (RSU), y según datos reportados por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en 2004, la generación de este tipo de residuos en todo el país fue de 94,800 toneladas diarias, equivalentes a 34.6 millones de toneladas anuales. Se estima que el resto, entre 5 y 6 millones de toneladas, pertenecen a residuos peligrosos (RP) (PÉREZ,

2012).

Norma Oficial Mexicana NOM-126-SEMARNAT-2000. Por la que se establecen las especificaciones para la realización de actividades de colecta científica de material biológico de especies de flora y fauna silvestres y otros recursos biológicos en el territorio nacional, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de marzo de 2001.

Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de diciembre de 2010.

Norma Mexicana NMX-AA-120-SCFI-2006 Que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas, cuya declaratoria de vigencia fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 2006.