



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO

**“RECUPERACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
(LDPE) A PARTIR DE EMPAQUES TETRA PAK”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN PLÁSTICOS

P R E S E N T A

ROSE MARY GÓMEZ TORRES

DIRECTORES:

Dr. Víctor Varela Guerrero

M. en C. A. Liliana Ivette Ávila Córdoba

TIANGUISTENCO, MÉX. JUNIO 2014



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México


Unidad Académica Profesional Tianguistenco

El comité revisor designado por la Unidad Académica Profesional Tianguistenco de la Universidad Autónoma del Estado de México, aprobó la tesis: **Recuperación de polietileno de baja densidad (LDPE) a partir de empaques Tetra Pak**, del C. Rose Mary Gómez Torres el día 23 de Mayo de 2014.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2014, 70 Aniversario de la Autonomía ICLA-UAEM"




Subdirección Académica
UAP
Tianguistenco


Dr. Victor Varela Guerrero

Vo. BO


M.en C. Isaías Alcalde Segundo


Dr. Orlando Soriano Vargas



www.uaemex.mx

Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapan, Tianguistenco Estado de México

CP. 52640

Teléfono (722) 4810800

Dedicatorias

A mis papás Juana Torres Hernández y Guillermo Gómez Sotero, por ser el principal apoyo que Dios me dio y porque gracias a ellos logre llegar hasta el fin de uno de los objetivos de mi vida.

A mis hermanos Norma Sarai Gómez Torres y César Abimael Gómez Torres, por ser parte de este éxito ya que con entusiasmo me ayudaban a dar los pasos necesarios para salir adelante.

A la hermana Jesu, que a pesar de la distancia siempre se preocupó, me dio todo su cariño y me ayudo a creer en mí.

A mis amigos que me tuvieron paciencia en los momentos de disgusto y desesperación principalmente a ti Carlos Contreras de Fuentes.

Agradecimientos

A Dios por haberme dado salud, paciencia, fuerza y principalmente amor y fe para llegar al final del camino logrando metas y objetivos.

A mis maestros por sus enseñanzas.

Dr. Víctor Varela Guerrero por haber permitido que formara parte de su equipo de trabajo y por el apoyo que me brindó durante esta etapa de mi vida.

M. en C. A. Liliana Ivette Ávila Córdoba por todo su apoyo, comprensión y principalmente por haber compartido conmigo algunas experiencias de vida que me dejaron conocimiento y buenos ejemplos a seguir.

A mis revisores.

M. en C. Isaías Alcalde Segundo, Dr. Orlando Soriano Vargas por ayudarme a culminar uno de mis objetivos.

A Mariné Monserrat Arcos Rivera por haber formado parte de mi vida y de una de mis más grandes pasiones que me ayudó a salir adelante.

CONTENIDO

	PÁG.
RELACIÓN DE TABLAS.	i
RELACIÓN DE FIGURAS.	ii
RELACIÓN DE GRÁFICAS.	iii
RELACIÓN DE DIAGRAMAS.	iiii
RESUMEN.	1
INTRODUCCIÓN.	3
Capítulo I. MARCO TEÓRICO.	5
1.1. Contexto socioeconómico y ambiental del uso y consumo de envases Tetra Pak en México.	5
1.2. TetraPak.	7
1.2.1 Origen.	7
1.2.2 Características idóneas de los envases.	8
1.2.3. Composición.	10
1.2.4. Manufactura y producción de envases Tetra Pak.	13
1.2.4.1. Manufactura.	13
1.2.4.1.1. Extrusión.	13
1.2.4.1.2. Coextrusión.	14
1.2.4.1.3. Laminación.	14
1.2.4.1.4. Metalización.	14
1.2.4.1.5. Impresión.	15
1.2.4.2. Producción.	16
1.2.5. Técnicas de reciclaje de Tetra Pak.	17
1.2.5.1. Conformado de Tectán a través de empaques Tetra Pak.	18
1.2.5.2. Reciclaje de Tetra Pak por pirolisis.	20
1.2.5.3. Reciclado de cartones para bebidas por el proceso de repulpado.	23
1.3. Polietileno PE.	25

1.3.1. Clasificación.	27
1.3.1.1 Polietileno de alta densidad.	28
1.3.1.2 Polietileno lineal de baja densidad.	28
1.3.1.3. Polietileno de baja densidad.	29
1.3.1.3.1. Proceso de producción.	29
1.3.1.3.1.1. Proceso en autoclave.	31
1.3.1.3.1.2. Proceso tubular.	31
1.3.1.3.2. Características.	32
1.3.1.3.3. Propiedades.	33
1.3.1.3.3.1. Propiedades mecánicas.	33
1.3.1.3.3.2. Propiedades físicas.	34
1.3.1.3.3.3. Propiedades químicas.	35
1.3.1.3.3.4. Propiedades eléctricas.	37
1.3.1.3.4. Aplicaciones.	37
1.3.1.3.5. Consumo en México.	38
Capítulo II. PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE LDPE.	42
2.1. Técnicas tradicionales de reciclaje de polietileno de baja densidad.	42
2.1.1. Tratamiento primario.	42
2.1.2. Tratamiento secundario.	47
2.1.3. Reciclado terciario o químico.	47
2.2. Posibles usos alternativos para productos fabricados a partir de LDPE reciclado.	49
Capítulo III. MATERIAL Y MÉTODOS.	52
3.1. Material, reactivos y equipo.	52
3.1.1. Material.	52
3.1.2. Reactivos.	52
3.1.3. Equipo.	52
3.2. Metodología.	53
3.2.1. Diagrama de flujo.	53

3.3.2. Descripción del proceso de separación Aluminio-polímero.	54
3.2.2.1. Modificación y réplicas del proceso.	54
3.2.2.1.1. Desprendimiento de cartón por medio del lavado.	54
3.2.2.1.2. Molienda.	56
3.2.2.1.3. Separación del polímero por medio de un calentamiento.	67
3.2.2.1.4. Filtración del polímero con saturación de aceite.	58
3.2.2.1.5. Lavado del polímero.	58
3.2.2.1.6. Filtrado del polímero después del lavado.	60
Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	61
4.1. Proceso de separación Aluminio-polímero.	61
4.1.1. Desprendimiento del cartón.	61
4.1.2. Molienda.	61
4.1.3. Separación por medio de un calentamiento.	62
4.1.4. Filtración del polímero con saturación de aceite.	62
4.1.5. Lavado del polímero.	63
4.2. Cantidad final de LDPE.	64
4.3. Porcentaje total de aceite.	67
4.4. Porcentaje final de cloroformo recuperado.	70
Capítulo V. CONCLUSIONES.	73
Capítulo VI. RECOMENDACIONES.	74
Capítulo VII. ANEXOS.	75
Anexo I. Propiedades moleculares básicas del LDPE.	75
Anexo II. Parámetros que influyen en la composición y rendimiento de los productos químicos resultantes de un proceso de pirolisis.	77
GLOSARIO.	78
REFERENCIAS	81

Relación de tablas

	PÁG.
No.1 Envases multicapa vendidos por Tetra Pak [26].	16
No.2 Propiedades mecánicas del LDPE [37].	33
No.3 Propiedades físicas del LDPE [42,43].	35
No.4 Propiedades químicas del LDPE [42, 43].	36
No.5 Propiedades eléctricas del LDPE [42, 43].	37
No.6 Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje químico para el LDPE [50].	48
No.7 Cantidades de material utilizado para cada uno de los lavados de polímero.	59
No.8 Cantidades de LDPE obtenidos por cada muestra después de ser lavado con cloroformo.	5
No.9 Cantidades totales de LDPE recuperado y aceite presente en cada muestra.	66
No.10 Cantidad total de aceite recuperado en las etapas del proceso (Calentamiento y lavado de LDPE).	68
No.11 Cantidad total de cloroformo recuperado por cada muestra.	71

Relación de figuras

	PÁG
No.1 Envases flexibles Tetra Pak [14].	8
No.2 Estructura de un envase flexible Tetra Pak [13].	10
No.3 Equipo extrusor [11].	13
No.4 Películas metalizadas [11].	15
No.5 Proceso de producción del tectán [31].	20
No.6 Esquema del proceso de pirólisis [30].	22
No.7 Cartones Tetra Pak y agua dentro del hidropulper [29].	23
No.8 a) Orbitales híbridos sp^3 con lóbulos asimétricos, b) Orbitales híbridos sp^3 direccionados a los vértices de un tetraedro, c) Configuración electrónica sp^3 para la cadena principal de polietileno [34, 35].	25
No.9 Polietileno en forma de pellets [37].	26
No.10 Esquema de los tres tipos de polietileno [31].	27
No.11 Estructura de la cadena del polietileno de alta densidad [31].	28
No.12 Fórmula estructural de LDPE [31].	30
No.13 Aplicaciones del polietileno de baja densidad [37].	38
No.14 Desechos de polietileno en una planta recicladora [30].	42
No.15 Separación manual de contaminantes de la película de LDPE [37].	43
No.16 Disminución de tamaño del material plástico con un molino de cuchillas [37].	43
No.17 Envase de HDPE y película de LDPE utilizadas para reciclarse [48].	45
No.18 Proceso esquemático del reciclado de LDPE para formar pellets [37].	46
No.19 Aislante eléctrico de LDPE reciclado [37].	49
No.20 Tubo fabricado con LDPE reciclado [37].	50

No.21	Tubo de pared gruesa elaborado con LDPE [37].	50
No.22	Filamento de LDPE reciclado [37].	51
No.23	Instalaciones químicas con partes plásticas elaboradas con LDPE reciclado [37].	51
No.24	Envase Tetra Pak cortado transversalmente para formar una lámina.	54
No.25	Desprendimiento del cartón de los envases Tetra Pak por medio de un lavado.	55
No.26	Lámina de Tetra Pak libre de cartón.	55
No.27	Molienda de Tetra Pak.	56
No.28	Tamaños de la muestra de Tetra Pak obtenidos después de la molienda.	56
No.29	Materiales con los que se realiza el proceso de separación de LDPE.	57
No.30	Aluminio obtenido después del calentamiento.	57
No.31	Filtración del aceite que contiene el polímero.	58
No.32	Etapa de lavado del LDPE obtenido a partir de envases Tetra Pak.	59
No.33	Filtración del polímero después de ser lavado con cloroformo.	60
No.34	Polietileno de baja densidad mezclado con aceite.	62
No.35	Polímero recuperado con saturación de aceite.	63
No. 36	. LDPE después de ser lavado con cloroformo.	63
No.37	Muestra de LDPE fundido	64
No.38	Aluminio con saturación de aceite.	68
No.39	Cloroformo recuperado después de la filtración.	70

Relación de gráficas

	PÁG.
No.1 Composición del Tetra Pak en porcentaje [15].	12
No.2 Usos del polietileno de baja densidad [44].	39
No.3 Situación del polietileno de baja densidad en México de 2006 a 2011 [45].	40
Np.4 Producción de película de LDPE en México en el año 2011 [45].	41
No.5 Comparación de la cantidad de aceite al inicio del proceso con la cantidad de aceite al finalizar el proceso.	69
No.6 Media del cloroformo inicial y del recuperado durante el proceso.	71

Relación de diagramas

	PÁG.
No.1 Pasos que se llevaron a cabo durante el desarrollo del presente trabajo.	

53

RESUMEN

Los residuos sólidos se definen como aquellos materiales que originados en cualquiera de las actividades de producción, transformación y consumo no alcanzan ningún valor económico en el contexto en el que son generados. Esta carencia de valor se debe en algunos casos, a la falta de tecnología para proceder a su recuperación y reutilización. Un ejemplo de este tipo de desechos son los envases flexibles Tetra Pak que son ampliamente utilizados para envasar leche y jugo en todo el mundo [1].

Se estima que en 2010, México tuvo una producción de 6,000 millones de estos envases y solo se recuperó el 15%. De acuerdo a lo anterior, se genera una gran cantidad de residuos de este tipo de envase; por lo que en el presente trabajo, se planteó el objetivo de recuperar polietileno de baja densidad (LDPE *LowDensityPolyethylene*; por sus siglas en inglés) a partir de empaques de desecho Tetra Pak, tomando como base el proceso de separación polímero-aluminio. Para este fin se utilizan materiales de desecho como el aceite vegetal (requemado) y empaques flexibles tipo Tetra Pak [2,3].

Para tal efecto la metodología empleada consistió en realizar:

- Desprendimiento de cartón de los envases Tetra Pak por medio de un lavado.
- Molienda del Tetra Pak.
- Réplicas del proceso de separación polímero-aluminio.
- Limpieza del polietileno de baja densidad recuperado con cloroformo (CHCl_3).
- Comparación del LDPE recuperado con lo reportado en la literatura.

Al seguir la metodología planteada se encontró que se recupera aproximadamente el 80% de polietileno de baja densidad, realizando los procesos con una muestra de 10g de Tetra Pak y 100g de aceite vegetal requemado.

El aceite utilizado en el proceso tiene una recuperación alrededor del 80% por lo que este puede ser utilizado nuevamente en dicho proceso. Del cloroformo utilizado para la limpieza del polímero LDPE se pierde, aproximadamente, un 4% por evaporación. Los resultados finales fueron analizados en el programa estadístico SPSS 18 versión en español, utilizando la prueba de Wilcoxon, con la que se demostró que existe diferencia significativa mínima en cuanto a los materiales recuperados en el proceso de recuperación de LDPE implementado.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen problemas ecológicos y ambientales, que están deteriorando y modificando los ecosistemas. La explotación industrial ha provocado el incremento del precio del petróleo, escases de electricidad, alimentos, empleo y materias primas para la producción [4].

La falta de conciencia en algunos de los seres humanos en la preservación de los ecosistemas, ha llevado un deterioro del medio ambiente a causa de la contaminación, así como también la falta de programas sustentables para controlar la contaminación y el abuso irracional de recursos naturales, como los derivados de combustibles fósiles, ha traído como consecuencia un grave deterioro ambiental [4].

Aún cuando el uso de los materiales plásticos, han revolucionado a la industria mundial y sus cualidades han mejorado a la par en el desarrollo de la ciencia; contribuye de forma importante a la contaminación [4].

Actualmente, el desafío es mayor; ya que se busca mejorar cualitativamente el reciclaje de este tipo de residuos, de manera tal que deje de ser un residuo no degradable y reduzca o mantenga sus costos de producción. Con el paso del tiempo y el desarrollo de las industrias, la calidad de los envases se ha diversificado y mejorado [5].

La recuperación del LDPE, ha sido una forma importante del reciclado para poder aprovechar los recursos en el país que actualmente son inutilizados. Un ejemplo de estas tecnologías de reciclaje es el desecho de Tetra Pak.

En 2010, México tuvo una producción de 6,000 millones de envases Tetra Pak, de los cuales solo se reciclaron el 15%, aprovechando principalmente el cartón con lo que se fabricó papel de baño, servilletas y pañales. Tetra Pak México, espera

competir con algunos países como Alemania que recicla 76,000 ton/año o España que alcanza las 53,000 ton/año [2].

De acuerdo con la problemática anterior, en el presente trabajo se planteó como objetivo general: recuperar el polietileno de baja densidad, que se encuentra en los empaques Tetra Pak considerados de desecho, utilizando aceite vegetal requemado.

Para lograr dicho objetivo, se tomó como base el proceso de separación aluminio-polímero [3]; haciéndole modificaciones, con la finalidad de remover las películas de LDPE que están adheridas al aluminio y darle una limpieza adecuada para que el material pueda tener un uso posterior en diversos artículos.

La presente tesis consta de 5 capítulos, el primero se refiere al marco teórico en donde se aborda el contexto socioeconómico y ambiental del uso y consumo de los envases Tetra Pak; también se describe su composición y las principales técnicas de reciclaje de dichos envases, se exponen las generalidades del polietileno de baja densidad, haciendo énfasis en sus características fisicoquímicas y sus propiedades mecánicas. En el segundo capítulo: "Procesos de recuperación de LDPE", se mencionan las técnicas tradicionales de reciclaje del polietileno de baja densidad, las aplicaciones posibles después de su recuperación. El capítulo tres expone el material, equipo, reactivos y la metodología llevada a cabo para lograr los objetivos planteados en el presente trabajo; en el capítulo cuatro se presentan las discusiones y resultados obtenidos al llevar a cabo el procedimiento de recuperación y limpieza del LDPE, en el capítulo cinco se encuentran las conclusiones del trabajo, en el capítulo seis se exponen algunas recomendaciones para complementar el proceso, y por último, en el capítulo siete se encuentran los anexos.

Capítulo I

MARCO TEÓRICO

1.1. Contexto socioeconómico y ambiental del uso y consumo de envases Tetra Pak en México.

Muchos de los alimentos requieren ser empacados en un envase que les permita mantenerse en condiciones óptimas para el consumo humano; al llegar el final de su vida útil, estos envases son desechados formando parte de residuos sólidos urbanos. Su excesiva producción trae consigo efectos negativos para el ambiente y la sociedad, los cuales no son tomados en cuenta debido a que aparentemente no implican ningún costo ambiental [6,7].

La fabricación de envases obedece a un ciclo de producción y consumo, y el impacto que estos ocasionan al ambiente son consecuencia del inadecuado manejo post-consumo. Desde el punto de vista técnico; existen soluciones para su manejo, pero el problema radica en que para seleccionar adecuadamente algún proceso específico es necesario contar con la infraestructura de un sistema de acopio, entre otros factores para un aprovechamiento óptimo de los envases [7].

La regulación para el manejo y tratamiento de envases de productos de consumo masivo, por parte de productores y consumidores, es un área que requiere atención, debido a los problemas de contaminación y disminución de recursos naturales [6].

En este sentido el reciclaje de algunos residuos sólidos como los empaques Tetra Pak se han considerado como una alternativa viable de recuperación de cartón, aluminio y polietileno de baja densidad, pero es necesario resaltar que al no ser comprados en centros de acopio, la sociedad no se ve incentivada en la selección

y recolección de este tipo de envases para su venta posterior, considerando este material como basura sin valor utilitario [6, 8].

Esto limita la creación y desarrollo de mercado ambiental para el reciclaje y recuperación de los materiales con que están elaborados los empaques Tetra Pak, cuya producción es considerablemente alta: en el año 2000 se produjeron 89,000 millones de cartones para bebidas de la empresa Tetra Pak. Desde 2003 se estima que en México se distribuyen 150 millones de envases Tetra BrikAseptic y se consume un promedio de 3 millones de envases de Tetra Pak al día [9, 10].

Hoy en día, el mercado de los empaques Tetra Pak apunta a envases estructurados técnicamente, muy visuales, de fácil manipulación y funcionales, entre otras características. Por esta razón es que la tendencia de los envases para alimentos está muy relacionada con el desarrollo de altas tecnologías que poseen proyecciones de crecimiento industrial; sin tomar en cuenta la posibilidad de reutilizar la materia prima [11].

Una ruta a considerar dentro de este crecimiento es el reciclaje, separando materiales del flujo de desecho y acondicionando para su comercialización; es decir, usarlos como materia prima en sustitución de materiales vírgenes para la elaboración de nuevos productos, tomando en cuenta: [12]

- El costo de las materias primas vírgenes.
- Disponibilidad de comercio exterior.
- Escases de recursos.

Conforme pasa el tiempo los envases alimenticios cambian constantemente tanto en forma, tamaño y peso, un ejemplo, son los empaques Tetra Pak. Los nuevos diseños y la innovación en los procedimientos de fabricación han permitido reducir la cantidad de papel necesario para su fabricación, lo que significa que se requieren menos recursos y energía para producir, almacenar y transportar [13].

El envase Tetra Paken general provee varias funciones: [11]

- Protección del producto (barrera contra la humedad, gases, protección contra sabor o luz).
- Facilidad de transporte.
- Reducción de costos.
- Incremento de mercado.

1.2.TetraPak.

1.2.1 Origen.

La empresa fue fundada en 1951 y establecida en Suecia por el Dr. Ruben Rausing, comenzando con la idea de fabricar un envase para leche elaborado con el mínimo de material mientras proveía máxima higiene; a este envase se le dio el mismo nombre de la empresa (Tetra Pak). Su desarrollo continuó con la introducción de un material plástico que cubriera su superficie.

Para 1961 se innovó convirtiéndose en el primer envase de cartón aséptico en el mundo, incorporándose una lámina gruesa de aluminio como barrera y un tratamiento de esterilización térmico para conservación de la leche (UHT, Ultra Alta Temperatura). En México se instala la primera planta, fuera de Suecia, productora de envases Tetra Pak y la capacidad de producción excede 1 billón de envases anualmente [12, 14, 15].

Las innovaciones únicas de Tetra Pak han cambiado la forma en que los alimentos son envasados y distribuidos en todo el mundo [15].

1.2.2 Características idóneas de los envases.

Los envases flexibles Tetra Pak, son cuerpos tridimensionales hechos de materiales complejos que se dejan enrollar, doblar, formar y fraccionar (ver Figura 1), estas funciones son cumplidas gracias a las propiedades de las resinas termoplásticas utilizadas en el diseño de los envases [15].



Figura 1. Envases flexibles Tetra Pak [14].

Los envases flexibles deben de cumplir varias características específicas tales como:

- a) Contención. Debe proveer resistencia mecánica; esta propiedad determina la cantidad de material plástico que se necesita para formar la pared de un envase.

La resistencia a bajas temperaturas permite que los alimentos envasados puedan mantenerse en refrigeración o en congelación para estar en óptimas condiciones de preservación al consumidor [11].

- b) Protección. Se incluyen aspectos tales como la hermeticidad de sellos y funciones de barrera.

Todos los envases flexibles deben ser cerrados de alguna manera y la gran mayoría son por termosellado (proceso de unión de las capas o lámina que

forman el envase, se funde con otra capa para producir la unión de sellado) [11].

La hermeticidad del sello se logra conociendo al material del envase y las condiciones de sellado:

- Temperatura de sellado.
- Presión de sellado.
- Tiempo de residencia del material en las mordazas.
- Tipos de materiales a envasar.
- Espesores de la película.

Las funciones de barrera permiten al alimento estar libre de gases y vapores tales como: oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, aromas, etcétera [11].

- c) Capacidad de procesamiento. Es necesario considerar los siguientes aspectos: propiedades térmicas del envase; es decir, si puede ser: esterilizable u otro método de aplicación directa de calor, además de ser congelable [11].
- Resistencia del sello en caliente.
 - Propiedades mecánicas del envase.
- d) Respeto al medio ambiente. Es necesario conocer el comportamiento de los materiales poliméricos e impacto sobre el ambiente desde el punto de vista de su reciclado [11].
- e) Presentación del producto. El envase es un elemento muy importante de atracción para el cliente. Por ello el envase flexible debe presentar propiedades ópticas como: el brillo, transparencia u opacidad. Además de contar con un diseño atractivo y colorido que provea la información necesaria para el consumidor [11].
- f) Costo. Los envases estructurados como los laminados aumentan su costo relativamente dependiendo del número de capas que contenga el envase, además se debe considerar si es de alta o de baja barrera [18].

1.2.3. Composición.

Los cartones para bebidas deben su eficacia a su fabricación en capas (laminado). Cada capa es de un material diferente y apropiado para una función concreta. Combinando capas que tengan sólo la cantidad necesaria de cada material para satisfacer todas las funciones requeridas, el peso y el volumen del envase en su conjunto se reducen al mínimo, mientras que se garantiza la protección del producto, la funcionalidad y comodidad para los consumidores [12].

El envase para bebidas Tetra Pak está compuesto principalmente de capas delgadas de papel rígido o cartón, colocadas entre capas finas de polietileno de baja densidad y tratándose de envases asépticos para bebidas de larga duración se añade una capa de aluminio [12] (ver Figura 2).



Figura 2. Estructura de un envase flexible Tetra Pak [13].

A continuación se describe brevemente los materiales que componen los envases Tetra Pak.

- a) Cartón (el material principal). Por término medio el 75-80% de un envase para bebidas es cartón (en peso). Como un dato relevante: un árbol de 1m³ proporciona pasta de papel suficiente para fabricar 13,300 envases de litro (ver Gráfica 1).

Una de las principales propiedades mecánicas de este material es la rigidez, esta depende de la cantidad de fibras que lo conforman.

El grosor y el volumen son aspectos significativos en su elaboración final, ya que el producto debe soportar los pesos de las cargas manteniendo su forma [19].

- b) Polietileno de baja densidad (LDPE). Este material representa el 15-20% del peso de los envases para contener líquidos (leche y jugos). El LDPE proporciona estanqueidad al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. El uso de las capas más finas posibles de polietileno de baja densidad (la capa exterior tiene sólo 12 micras de espesor) minimiza el empleo de recursos [15, 19] (ver Gráfica 1).

- c) Aluminio. (Sólo está presente para cartones de productos de larga duración). Cuando se usa, la hoja de aluminio sólo representa un máximo del 5% del peso del cartón para bebidas Tetra Pak.

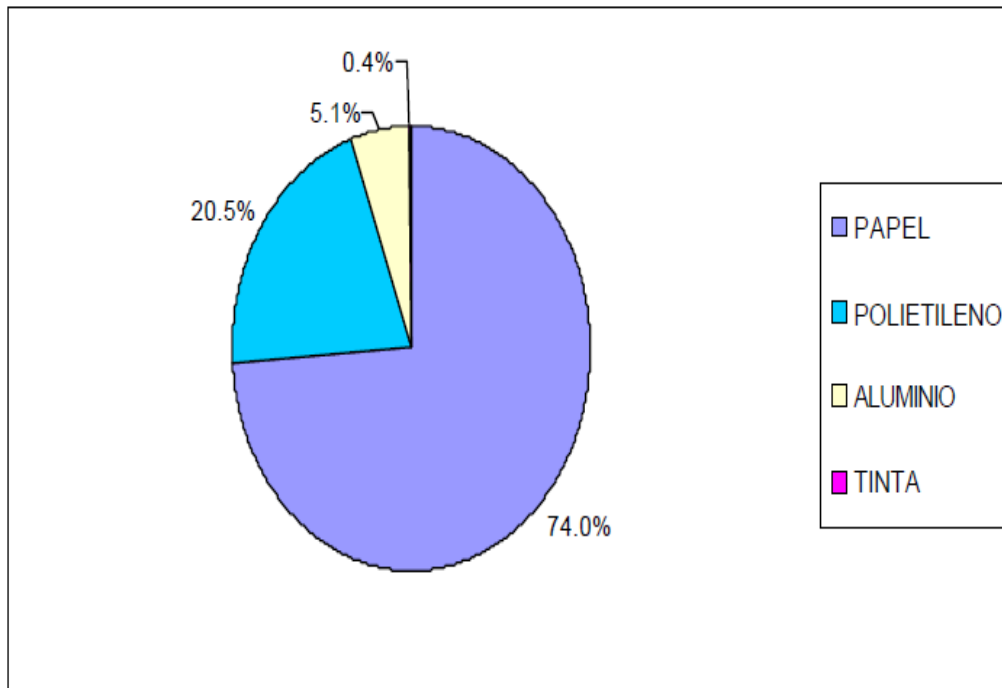
El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera extremadamente eficaz contra el oxígeno. La hoja de aluminio es una solución muy práctica para esta necesidad porque permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados y así ahorra la energía que sería necesaria para su refrigeración, el transporte y en el almacenamiento (Ver Gráfica 1) [15, 19].

El aluminio se extrae principalmente de la bauxita (Al₂O₃); siendo un metal blando y dúctil, pero se puede aumentar su dureza por métodos mecánicos como la extrusión o mediante la formación de una solución sólida con un soluto (formar una aleación) [20].

Este es un material ligero y resistente a la corrosión, por lo que tiene múltiples aplicaciones entre las que incluyen la fabricación de partes

automotrices; así como en la construcción de ventanas, puertas y utensilios de cocina [20].

- d) Tintas. La tinta que utiliza Tetra Pak es base agua, con pigmentos orgánicos y sin metales pesados. Su proporción en el envase ocupa solo el 0.4% en peso [15] (ver Gráfica 1).



Gráfica 1. Composición del Tetra Pak en porcentaje [15].

Los nuevos diseños y la innovación en los procedimientos de fabricación, han permitido reducir la cantidad de papel necesario para producir los envases flexibles, el cual es protegido de la humedad por la capa doble de polietileno de baja densidad en el interior del envase, sellada térmicamente [9].

Por su parte, la lámina de aluminio elimina la necesidad de refrigeración y contribuye al ahorro de energía; los envases actuales contienen 30% menos de aluminio que el empleado cuando fue creado el envase Tetra Pak [15].

1.2.4. Manufactura y producción de envases Tetra Pak.

1.2.4.1. Manufactura.

La fabricación de envases flexibles consta de varias etapas de conversión que corresponden a:

1.2.4.1.1. Extrusión.

Proceso mediante el cual se da forma a una lámina, en donde la resina termoplástica es sometida a alta temperatura y presión, forzándola a salir por una abertura específica (dado o cabezal) (ver Figura 3) [11].



Figura 3. Equipo extrusor [11].

1.2.4.1.2. Coextrusión.

Proceso en el cual varias capas de resinas plásticas son extruidas simultáneamente formando una sola lámina. Generalmente se utiliza para fabricación de películas multicapa, con propiedades de barrera [11].

El proceso es complejo ya que existen distintos materiales que se están fundiendo a la vez; los cuales presentan temperaturas de fusión, reologías y flujos muy distintos para poder lograr una buena estructura [11].

1.2.4.1.3. Laminación.

Adición de una sustancia a una matriz polimérica, que por la acción de un adhesivo se unen con el objetivo de mejorar aún más sus propiedades de barrera a aromas. El proceso se realiza en cámaras de laminación, en donde se instalan las bobinas que deben ser laminadas, estas bobinas se hacen circular por rodillos para que uno de estos pase por una tina en donde hay see aplica el adhesivo, una vez aplicado se junta con otra bobina para pasar por una zona de secado, al salir de esta etapa nuevamente son bobinadas las láminas adhesivas siguiendo un paso posterior que se denomina fraguado que se realiza en una cámara estancada a 37°C durante 24h [11].

1.2.4.1.4. Metalización.

Comenzó a ser usada en envases para alimentos en la década de los años sesenta. Desde entonces el incremento de este producto en el mercado ha sido posible gracias al mejor entendimiento de sus propiedades protectoras; por lo que hoy en día es un importante material de barrera a la humedad y al oxígeno [11].

Una película metalizada es normalmente plástica, sobre la cual se ha aplicado un delgado recubrimiento metálico [11] (ver Figura 4).



Figura 4. Películas metalizadas [11].

El término metalización es genérico, puesto que es posible realizar aplicaciones de diversos metales; sin embargo, cuando se trata de envases flexibles, al decir metalización se refiere a la aplicación de un recubrimiento de aluminio. La cual consiste básicamente en vaporizar el aluminio por medio de calor y alto vacío, posteriormente es condensado sobre una película base fría en un cilindro. De la cantidad de metal depositada dependen las propiedades de la película [21].

1.2.4.1.5. Impresión.

En este proceso, se aplican las tintas al material de envase, de una manera controlada y conforme a un patrón, que es definido por el cliente (presentación del

producto), este tratamiento se lleva a cabo mediante la técnica flexográfica, que corresponde a un proceso tipográfico rotativo alimentado por rodillos de sustratos flexibles. Se utilizan tintas base agua con disolventes de secado rápido [11].

1.2.4.2. Producción.

Un envase tiene como función principal conservar los alimentos, así como también protegerlos de la contaminación y descomposición, causados por exposición al ambiente. Los envases han evolucionado a lo largo del tiempo gracias a la tecnología, con ello se permite el almacenaje del alimento en cantidades adecuadas, así como facilitar y economizar el transporte, garantizando el excelente estado del producto [22].

México fue el primer mercado al que Tetra Pak se extendió en el mundo. En 1996 Tetra Pak México vendió 3,000 millones de envases, lo que representa el 3.7 % de los 80,000 millones de envases que comercializa a nivel mundial [23, 24].

El grupo industrial Tetra Pak en América Latina cuenta con plantas de transformación en Chile, Argentina, Colombia y México [25].

La información sobre estos países se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Envases multicapa vendidos por Tetra Pak [26].

País	Año	Millones de envases vendidos
Brasil	1999	6.000
México	2004	4.400
Colombia	2004	592
Chile	2005	0.780

1.2.5. Técnicas de reciclaje de Tetra Pak.

Específicamente, la recuperación de polietileno de baja densidad encontrado en los empaques Tetra Pak no se ha podido generar, ya que no existen tecnologías ni procesos con los cuales se pueda obtener en la cantidad y calidad adecuada para darle un uso posterior [12].

El cartón laminado que conforma los envases tiene alto valor calorífico, si se considera que dos toneladas de envases de este tipo equivalen aproximadamente al valor energético de una tonelada de gasolina, por lo cual al desecharse pueden ser empleados como combustible alternativo para recuperar energía [12].

Uno de los factores limitantes para el éxito de los programas de reciclaje que promueven las empresas productoras de Tetra Pak en los diferentes países en los que se encuentran, incluyendo México, es la separación eficiente de los envases vacíos en las fuentes que los generan (se estima que en México, todos los años se distribuyen 150 millones de raciones de leche envasadas en Tetra BrikAseptic a los niños) [15].

Tetra Pak contribuye a desarrollar programas de reciclaje de envases usados, trabajando con sus clientes, las autoridades municipales, las universidades, la comunidad y la industria papelera [27].

La idea es apoyar a las ciudades interesadas en desarrollar Programas de Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos, que incluyan separación en la fuente de generación, recolección selectiva, y valorización de sub-productos. Dichos programas introducen criterios de eficiencia ambiental, económica y social en los sistemas de limpieza pública de los municipios, reduciendo el volumen de residuos que se destinan al relleno sanitario y permitiendo captar mayores volúmenes de productos post-consumo para su reciclaje [28].

Los proyectos son desarrollados a través de: Compromiso Empresarial Para el Manejo Integral de los Residuos, A. C., organización privada sin fines de lucro

integrada por: Bimbo, Coca-cola, Pepsi, Sabritas y Tetra Pak. Como primera etapa se suscribe un Convenio de Colaboración vinculando empresa-municipio-universidad. Para su desarrollo se elaborarán diagnósticos donde se encuentran diseñados los modelos específicos para cada región y se establecen las rutas piloto de recolección selectiva, para posteriormente ampliar la cobertura gradualmente. Las empresas mencionadas anteriormente, apoyan a los municipios durante la etapa de educación y capacitación ambiental al público en general [27, 28].

Entre los Programas más avanzados y de mayor cobertura se encuentra el denominado "Separemos la Basura" del Municipio de Querétaro. Actualmente están en proceso de implementación de programas municipales de manejo integral de residuos con las ciudades de Aguascalientes, Torreón y Cancún [28].

1.2.5.1. Conformado de Tectán a través de empaques Tetra Pak.

La fabricación de distintos tipos de planchas de aglomerado para los más diversos usos es la solución elegida mayoritariamente en países asiáticos. Una ventaja de este aglomerado es la resistencia al ambiente, a causa de su impermeabilidad ya que el polietileno que se encuentra en los envases Tetra Pak actúa de aglomerante, al fundirse tras ser colocados los envases previamente procesados en una prensa de calor [29].

Así, existen fábricas de un material llamado Yekpan en Turquía, que ha alcanzado, en sólo cuatro años, una cuota del 20% de reciclado respecto de los envases Tetra Pak consumido allí, y cuenta con una capacidad de 1,350 ton/año. En Pakistán, el producto final se denomina Chiptec, al igual que en China, donde ya existen tres fábricas de este material, con una capacidad de 9.000 ton/año. La Agencia China de Protección Ambiental incluyó al Chiptec en 1997 como una de las tecnologías recomendables, a escala nacional, para la protección del medio

ambiente. En 1998 pasó con éxito el análisis realizado por el Comité Estatal para la Ciencia y la Tecnología [31].

Por su parte, en Argentina también se ha comercializado este tipo de material bajo la denominación T-Plak distribuida por la empresa Rezagos Industriales. En Europa, la tradición comenzó en Alemania donde este material ha sido denominado Tectán (ver Figura 5), el cual es fabricado por una empresa de Limburgo [27, 31].

Con las planchas de Tectán se fabrican muebles y suelos; ya que se le puede dar muchas formas. Éste material fue el elegido por la Fundación Terra de Cataluña para las paredes de la casa ecológica que se construyó en el Barrio Gótico de Barcelona [31].

El proceso de fabricación para planchas de aglomerado a partir de cartones para bebidas usados es el siguiente:

- Los cartones triturados se lavan, se secan y se extienden en una capa del espesor deseado. Después se ponen en una prensa y se calientan a unos 170° C.
- El calor funde el contenido de polietileno (PE) que une la fibra densamente comprimida y los fragmentos de aluminio en una matriz elástica.
- La matriz resultante se enfría después, rápidamente, formando un duro aglomerado con una superficie brillante e impermeable [31].

El polietileno es un agente de unión muy eficaz, de manera que no es necesario añadir cola o productos químicos como el formaldehído de urea o también llamado urea-metanal (adhesivo que no se ablanda con el calor y es utilizado en tableros de densidad media) que se usa para mantener unidos los aglomerados y chapas convencionales de madera [27].

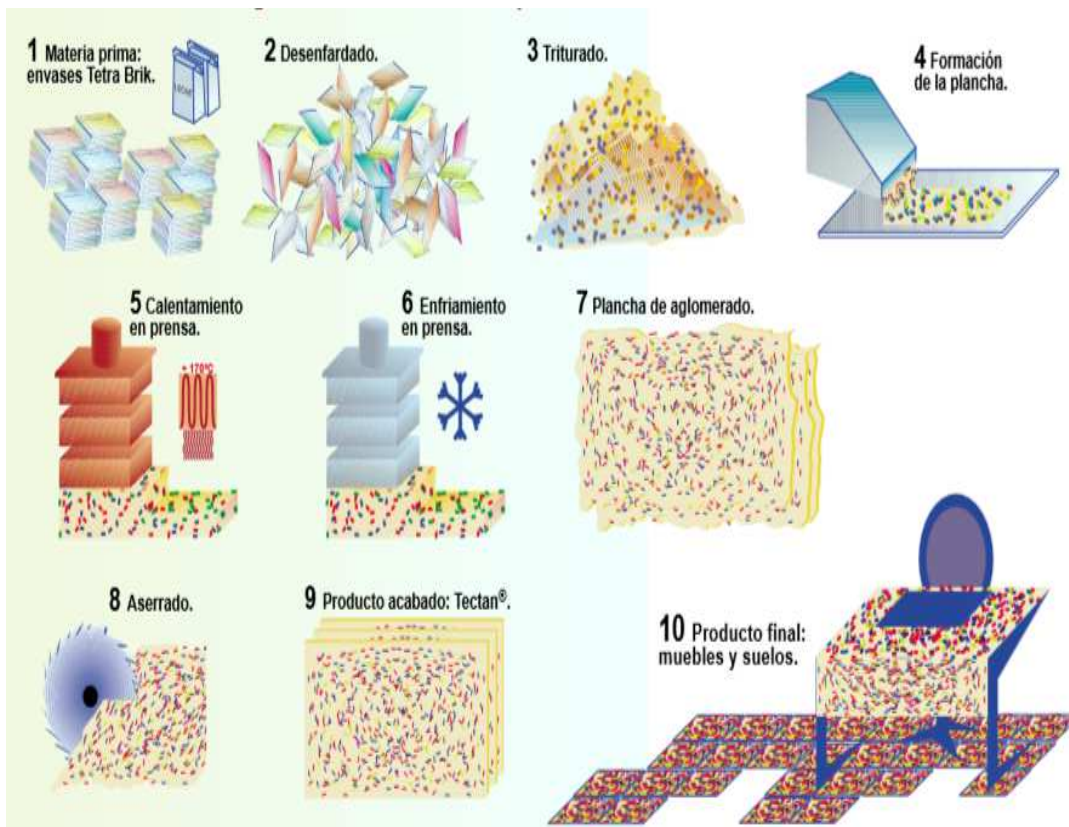


Figura 5. Proceso de producción del tectán [31].

1.2.5.2. Reciclaje de Tetra Pak por pirolisis.

Actualmente, la mejor manera de separar el aluminio del LDPE encontrados en los empaque Tetra Pak es la pirolisis, donde los dos son calentados en una atmósfera controlada a una temperatura lo suficientemente alta para gasificar el LDPE dejando al aluminio intacto y limpio. El polietileno de baja densidad gasificado es un excelente combustible [29].

Otra posibilidad, es introducir los residuos de LDPE y aluminio en hornos de cemento. El LDPE sirve como combustible de alta energía, mientras que el aluminio se oxida y así reemplaza a la bauxita virgen (Al_2O_3), que es un ingrediente esencial del cemento [29].

Tetra Pak, reporta que España y Brasil son los únicos países que han logrado reciclar el polietileno y el aluminio de dichos empaques. Brasil ha patentado un proceso de reciclaje del papel, en donde se recupera el aluminio y polietileno de baja densidad en gránulos que pueden ser inyectados. España por su parte, cuenta con una empresa llamada “Estora Enso”, donde se utiliza una tecnología de pirólisis para producir gas y aluminio de alta calidad. Este proceso de reciclado se realiza desde 1992, consiste en la separación de las fibras de cartón de las capas de LDPE y aluminio. Primero se almacenan los envases en contenedores. Más tarde se utiliza un *hidropulper* (depósito con una hélice en el centro) donde los envases usados se mezclan con agua y se agitan, se realiza a temperatura ambiente y, mediante un movimiento rotacional que dura entre 15 y 30 minutos, se separan las diferentes capas [30].

Después, a través de filtros, la fibra de papel queda totalmente separada en forma de pasta. Posteriormente, esta pasta, se prensa y se dispone en unos rollos enormes que más tarde se seccionan (dependiendo del uso que vayan a tener) para poder ser utilizada para fabricar productos de papel como cajas de cartón [30].

Por su parte, el LDPE y el aluminio recuperados del proceso anteriorse pueden reciclar en una variedad de formas.

- Un sistema de reciclado mecánico en el que estos materiales se transforman en granza. A través de procesos de extrusión e inyección, esta granza se utiliza como materia prima para fabricar diferentes objetos: desde páneles de alta resistencia y vallas de obra, hasta objetos domésticos como cepillos y bandejas de plástico.
- Mediante la utilización de la tecnología de pirolisis. El LDPE y el aluminio también se separan, con la aplicación de altas temperaturas (400° C) en ausencia de oxígeno. Un porcentaje del polietileno de baja densidad se gasifica y se extrae para convertirlo en combustible y el porcentaje restante

se calcina para adquirir energía, mientras que el aluminio se recupera con gran pureza [30](ver Figura 6).

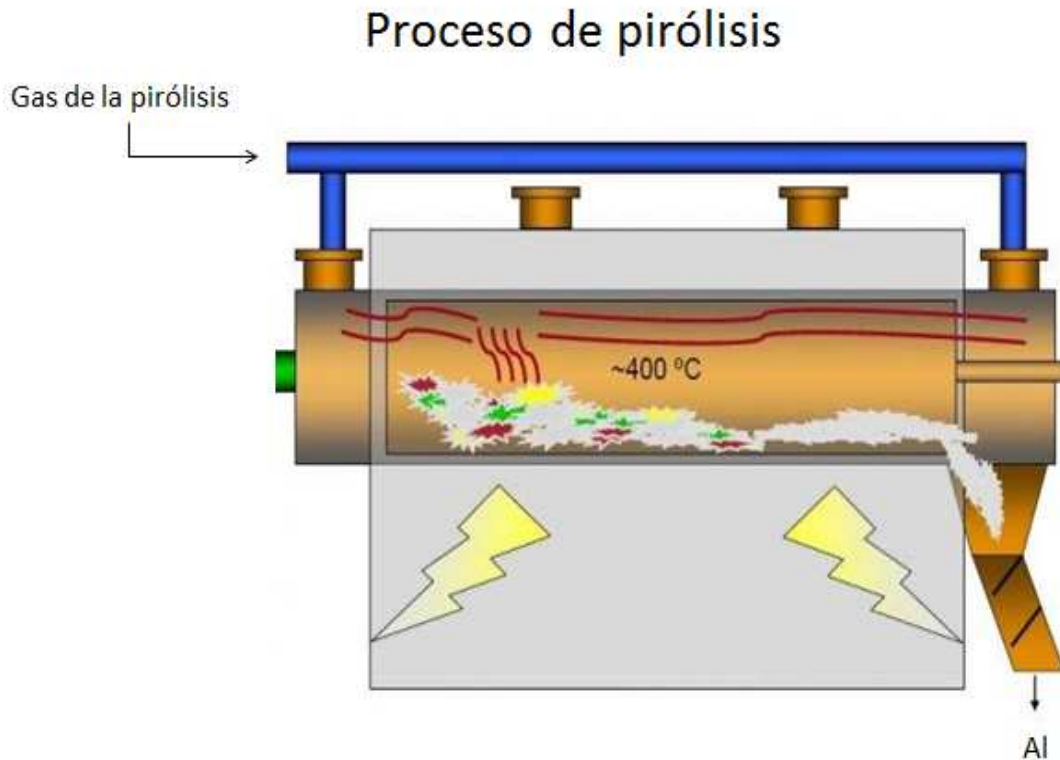


Figura 6. Esquema del proceso de pirolisis [30].

Este proceso es energéticamente auto-sostenible, ya que la cámara de pirolisis se calienta con parte del aceite y del gas obtenido y el resto se utiliza para producir el vapor necesario en la fabricación de papel, asociada a la planta de reciclaje. El aluminio que queda en la cámara se transforma en escamas, que se enfrían y se comprimen en lingotes para vender a la industria del aluminio y convertirse de nuevo en materia prima, cerrando así su ciclo de vida. Así, el aluminio recuperado se utiliza como parte en nuevos productos: coches, aviones o perfiles de ventanas [30].

1.2.5.3. Reciclado de cartones para bebidas por el proceso de repulpado.

El hidrapulpado es el proceso básico que se usa para separar las fibras de papel con las que se produce pasta, que a su vez se transforma en papel y cartón. Este proceso es ampliamente usado para reciclar residuos de papel, cartón y cartones para bebidas, permitiendo transformar en nuevos productos [29].

El proceso de hidrapulpado se lleva a cabo con agua y cartones para bebidas (ver Figura 7). La mezcla se agita entre 15 y 60 minutos hasta que se separan las fibras de papel, que quedan suspendidas en el agua. El LDPE y el aluminio son después retenidos por una serie de filtros que dejan pasar el agua y las fibras de papel que se utilizan para nuevos productos [29,30].



Figura 7. Cartones Tetra Pak y agua dentro del hidropulper [29].

La clave para obtener un buen hidrapulpado de cartones para bebidas es la eliminación eficaz de los componentes que no sean fibra: LDPE, hoja de aluminio, tintas e impurezas tales como barro, arena, chatarra y otros cuerpos extraños. Una típica línea de repulpado de cartón para bebidas puede constar de las siguientes unidades:

- Hydropulper.
- Filtrado de LDPE y aluminio.
- Criba gruesa y fina.
- Limpiador centrífugo (elimina los pequeños contaminantes de alta densidad).

La unidad de dispersión, garantiza la dispersión uniforme de los pequeños contaminantes que quedan, que se encuentran incluso en los papeles y cartones nuevos [29].

Una línea de hidropulpado recupera hasta el 98% de las fibras de los cartones para bebidas. Las capas de aluminio y LDPE recuperadas de este proceso son normalmente aprovechadas para generar vapor, que después se usa para secar la pulpa o para generar electricidad. El valor económico de la hoja de aluminio es alto, debido a la gran cantidad de energía requerida para extraer aluminio de la bauxita, en su estado natural. La producción del polietileno de baja densidad virgen es muy barata, por lo que el reciclado mecánico del polietileno de los cartones para bebidas es poco atractivo desde un punto de vista económico [29].

Un proyecto conjunto de investigación emprendido por GrängesEurofoil y Tetra Pakha demostrado que es técnicamente posible obtener aluminio reciclable del proceso de repulpado y que se pueden hacer nuevos cartones para bebidas con hojas que contengan un 30% de aluminio recuperado de los cartones para bebidas reciclados [27,29].

1.3. Polietileno PE.

El polietileno (PE) es un material sintético termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno, es semicristalino y parcialmente amorfo. Este plástico fue el primer polímero comercial y tiene lugar en el año 1939 [26, 31].

La estructura química del polietileno es: $-(CH_2-CH_2)-n$. La molécula está constituida en su unidad estructural por dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno unidos por enlaces de tipo covalente. Esta unidad básica se puede repetir indefinidamente para formar el polietileno [32, 33].

En muchas ocasiones la estructura de este material es complicada porque se generan ramificaciones alrededor de la cadena principal. Algunos carbonos en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos tienen cadenas pequeñas de polietileno, a este fenómeno se le denomina ramificación de la cadena. Los átomos de la molécula, se da por medio de enlaces sigma entre los átomos de carbono hasta formar grandes cadenas. Cabe mencionar que la hibridación del átomo de carbono en la molécula es sp^3 [33] (ver Figura 8).

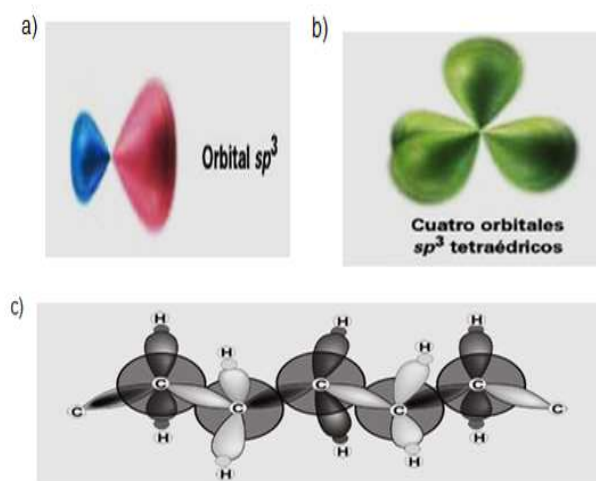


Figura 8. a) Orbitales híbridos sp^3 con lóbulos asimétricos, b) Orbitales híbridos sp^3 direccionados a los vértices de un tetraedro, c) Configuración electrónica sp^3 para la cadena principal de polietileno [34, 35].

Antiguamente el polietileno era llamado “polimetileno”, este pertenece al grupo de los polímeros de las poliolefinas. Este material plástico es un sólido blanco y translúcido (ver Figura 9). En secciones delgadas es transparente. A las temperaturas ordinarias es tenaz y flexible, y tiene una superficie relativamente blanda que puede rayarse con facilidad. A medida que aumenta la temperatura, el sólido se ablanda y funde a 110°C aproximadamente, transformando en un líquido transparente. Si se reduce la temperatura por debajo de la normal, el sólido se hace más duro y más rígido, y se alcanza una temperatura a la cual el material no puede doblarse sin romperse [37].



Figura 9. Polietileno en forma de pellets [37].

El descubrimiento hecho por Ziegler y Natta en los años 50 del siglo XX, de catalizadores capaces de polimerizar etileno a presiones y temperaturas menores a las que se estaban empleando revolucionó la producción de las poliolefinas. Estos catalizadores consisten en derivados de los metales de transición: titanio, vanadio o zirconio con compuestos organometálicos de aluminio. El polímero resultante de este nuevo proceso tuvo una estructura más cristalina, así como una mayor densidad, a este se le llamó polietileno de alta densidad. Casi al mismo tiempo, investigadores en los Estados Unidos descubrieron que catalizadores

basados en cromo, óxidos de molibdeno sobre sílice o sílice-alúmina, eran capaces también de polimerizar etileno a temperaturas y presiones menores [36].

Estos métodos basados en catalizadores además de mejorar la eficiencia del proceso controlan la masa molecular del polímero formado. El hidrógeno se emplea comúnmente como un regulador de la masa molecular. La polimerización en suspensión, en solución o en fase gaseosa se puede utilizar para la fabricación de polietileno [36].

1.3.1. Clasificación.

Los polietilenos son resinas termoplásticas producidas por procesos de alta o bien de baja presión; esto da como resultado una familia de polietilenos (ver Figura 10), que es clasificada principalmente por su densidad, de acuerdo con la ASTM (*American Society for Testing Materials*) [31].

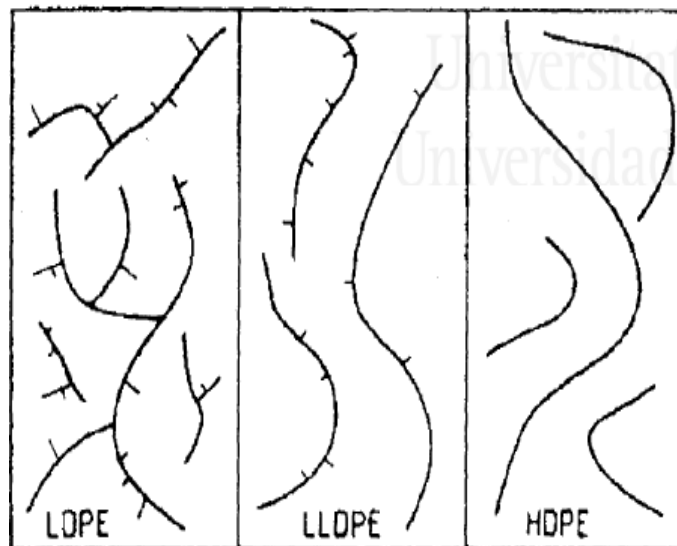


Figura 10. Esquema de los tres tipos de polietileno [31].

A continuación se describe la clasificación de la familia de polietilenos.

1.3.1.1 Polietileno de alta densidad.

Es un polímero con estructura lineal (ver Figura 11). Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas utilizando catalizadores Ziegler-Natta. Tiene una densidad comprendida entre 0.941- 0.954 g/cm³. Es incoloro, inodoro, no tóxico y resistente tanto a esfuerzos como a agentes químicos. Sus aplicaciones van desde materiales para la construcción, aislantes eléctricos, empaque, tuberías, botellas, juguetes, cajas, bolsas, tanques para agua, pistas de patinaje, redes para pesca y chalecos antibalas, entre otras [31].

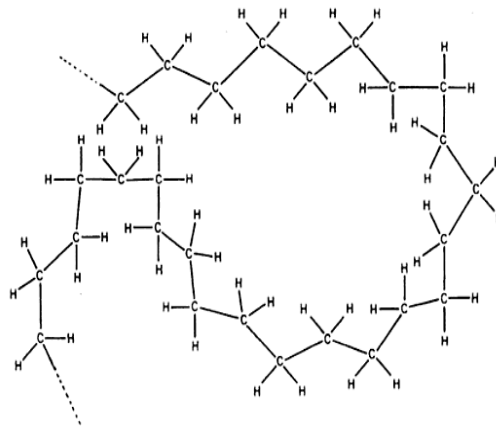


Figura 11. Estructura de la cadena del polietileno de alta densidad [31].

1.3.1.2 Polietileno lineal de baja densidad.

Polietileno lineal de baja densidad (PELBD o LLDPE): es un polímero con un esqueleto lineal y ramificaciones laterales muy cortas y uniformes, que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores al LDPE [31].

Específicamente, y como se ha mencionado en la fabricación de envases de Tetra Pak se emplea polietileno de baja densidad, el cual se describe a continuación.

1.3.1.3. Polietileno de baja densidad.

Polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE): es un polímero de adición, conformado por unidades repetidas de etileno. Generalmente, el proceso de polimerización más comúnmente empleado para este material se realiza a alta presión, 1500-2000 bar [31].

1.3.1.3.1. Proceso de producción.

El polietileno de baja densidad ha sido producido comercialmente por más de 60 años y es uno de los polímeros de mayor consumo en el mundo. En 2009 se estimó la producción de aproximadamente 64 millones de toneladas métricas [31].

Fue sintetizado por primera vez en 1898 por el químico alemán Hans Von Pechmann quien por accidente lo preparó cuando calentaba diazometano (CH_2N_2). En 1933 fue obtenido por Reginald Gibson y Eric Fawcett en Inglaterra, quienes trabajaban para los laboratorios de la empresa Imperial Chemical Inc. (ICI). Esto se logró aplicando una presión de aproximadamente 1400 bar y una temperatura de 170°C , sobre un recipiente que contenía etileno y benzaldehído. Sin embargo, la reacción había sido desencadenada por rastros de oxígeno contenidos en el recipiente y no fue posible replicarla con éxito hasta 1935, cuando otro químico de la misma compañía, Michael Perrin, desarrolló una síntesis industrial reproducible para el polietileno de baja densidad [36].

La primera tonelada de material demostró cualidades de aislamiento eléctrico inigualables y en 1938 ICI comenzó la producción industrial, que fue íntegramente absorbida por las necesidades bélicas. Terminada la guerra, el LDPE corría el riesgo de desaparecer de la cartera de productos ICI, pero los resultados de las investigaciones sobre posibles nuevas aplicaciones demostraron que era un material versátil [36].

Posteriormente, se desarrollaron catalizadores para estos procesos. El primer catalizador tuvo como base el dióxido de cromo (CrO_2) y fue descubierto en 1951 por Robert Banks y John Hogan en Phillips Petroleum[36].

Anteriormente este material polimérico (LDPE) era conocido como polietileno de alta presión, se trata de un polímero plástico ramificado que presenta extensiones de cadena secuenciadas de polietileno en distintos puntos de ramificación, acomodadas de una forma irregular a lo largo de la cadena principal del polímero, lo que disminuye su densidad [31] (ver Figura 12).

La producción de LDPE a gran escala, comenzó en 1950 y se lleva a cabo en un reactor tipo autoclave o tubular, utilizando iniciadores de radicales libres, que consisten principalmente en uno o dos peróxidos, que operan tanto en altas como a bajas temperaturas[38].

El mecanismo general implica las fases de:

- Iniciación por formación del radical libre.
- Propagación de la cadena del polímero.
- Terminación de la cadena.

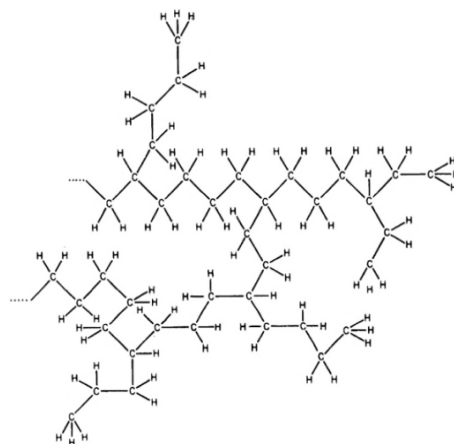


Figura 12. Fórmula estructural de LDPE [31].

La gran cantidad de calor generada durante la reacción es removida por medio de chaquetas de enfriamiento o por medio de una alimentación de etileno frío. Para la obtención de este material es necesario utilizar un etileno muy puro por lo que se deben eliminar impurezas inorgánicas (compuestos de azufre, óxido de carbono, etanol metanol e hidrogeno), que aunque no toman parte en la reacción de polimerización, actúan como diluyentes e influyen en el tiempo de reacción [38].

1.3.1.3.1.1. Proceso en autoclave.

Emplea un reactor autoclave con agitación y flujo continuo con una relación L/D (L= longitud, D= diámetro) que va de 2:1 a 20:1. El reactor puede estar dividido por bastidores a fin de formar una serie de zonas de reacción bien agitadas. El proceso en autoclave puede producir resinas de LDPE con un amplio intervalo de distribuciones de masas moleculares [39].

1.3.1.3.1.2. Proceso tubular.

El reactor consiste en un tubo largo con relaciones L/D (L= longitud, D= diámetro) mayores que 12000:1, esto es debido a que no hay agitación mecánica. La operación continua puede producir un flujo tapón [39].

En ambos procesos los separadores descendentes del reactor operan a presiones más bajas, separando el etileno que no reaccionó del polímero. Del separador se extruye el polietileno fundido a través de una nodulizadora sumergida en agua para formar gránulos que posteriormente son secados y almacenados [39].

1.3.1.3.2. Características.

El polietileno de baja densidad se obtiene por un mecanismo de radicales libres (especie química que se caracteriza por poseer uno o más electrones desapareados) a presiones muy altas: 1.5000 a 3.000 atmósferas. Tanto éste como el de alta densidad, son homopolímeros del etileno y la diferencia entre ellos es la cantidad y el tipo de ramificaciones [31].

EILDPE tiene muchas ramificaciones, de 25 a 30 grupos metilos(-CH₃) por cada 1,000 carbonos. Estas ramificaciones dificultan la aproximación de las cadenas y su colocación ordenada, disminuyendo el grado de cristalinidad (empaquetamiento de cadenas moleculares para producir una disposición atómica ordenada) [31].

La estructura cristalina se especifica en términos de celdas unitarias, que ordinariamente son complejas, dejando grandes espacios entre las cadenas y por ello el material tiene mayor densidad. Por lo mismo, las fuerzas de atracción entre cadenas adyacentes no pueden actuar plenamente y, al ser menor la fuerza de cohesión, el calor separa con mayor facilidad las cadenas y el polímero se reblandece a menor temperatura, tiene menor rigidez, mejor resistencia al impacto y mayor transparencia y flexibilidad que el de alta densidad, por lo que este material cuenta con las siguientes características [37].

- Alta resistencia al impacto.
- Resistencia térmica.
- Resistencia química.
- Se puede procesar por inyección o extrusión.
- Tiene una mayor flexibilidad en comparación con el polietileno de alta densidad.
- Su coloración es transparente, aunque se opaca a medida que aumenta el espesor.

Difícilmente permite que se imprima, pegue o pinte en su superficie [37].

1.3.1.3.3. Propiedades.

1.3.1.3.3.1. Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas del LDPE dependen principalmente de su densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular (ver Anexo 1), estos factores modifican las propiedades tales como la dureza, la resistencia al desgarro, la inflamabilidad, la resistencia a la intemperie, la resistencia química; y las respuestas biológicas, entre otras [37, 40].

Los efectos producidos por las variaciones de la densidad son:

- Baja densidad 0,910 a 0,925 g/cm³.
- Mediana densidad 0,926 a 0,940 g/cm³.
- Alta densidad 0,941 a 0,965 g/cm³ [37].

Las propiedades mecánicas del LDPE dependen de la cristalinidad y del grado de polimerización de este material [41]. La tabla 2 muestra las propiedades mecánicas del LDPE.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del LDPE [37].

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Alargamiento a la rotura (%)	400
Dureza Rockwell	D41 – 46
Módulo de tracción (GPa)	0,1 – 0,3
Resistencia a la tracción (MPa)	5 – 25
Resistencia al Impacto Izod (Jm ⁻¹)	>100

Todas las propiedades mencionadas, son sensibles a la historia térmica del polietileno de baja densidad. Si el material se enfría rápidamente desde el estado

fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menor; por consiguiente es más blando y más flexible y, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas y al agrietamiento en presencia de líquidos orgánicos.

Por otro lado, es probable que contenga más tensiones internas. El enfriamiento lento partiendo del estado fundido o el recocido de la muestra (tratamiento en agua hirviendo), da un producto más cristalino, más duro y algo más quebradizo; pero el sólido puede estar sometido a menos tensiones y es menos probable que se produzcan cambios lentos en las dimensiones al elevarse después la temperatura [41].

El LDPE sólido sufre deslizamiento en frío, como sucede a muchos otros polímeros; pero en virtud de su naturaleza cristalina, este movimiento es muy pequeño a temperaturas ordinarias, salvo bajo cargas que se aproximan al punto de cedencia; sin embargo, a temperaturas más altas, el corrimiento en frío es apreciable [41].

Cuando se somete una muestra a tracción, esfuerzo cortante o compresión, al principio se deforma rápidamente; pero la rapidez con que varían las dimensiones disminuye a medida que pasa el tiempo; por lo menos durante un cierto tiempo. A temperaturas más altas y con tensiones mayores se produce una deformación permanente del material [41].

1.3.1.3.3.2. Propiedades físicas.

El polietileno posee una buena tenacidad y flexibilidad en un amplio intervalo de temperaturas. Su densidad decrece rápidamente a temperaturas por encima del ambiente [42] (ver Tabla 3).

Tabla 3. Propiedades físicas del LDPE [42,43].

PROPIEDADES FÍSICAS	
Absorción de agua en 24h (%)	<0,015
Densidad (g/cm ⁻³)	0,92
Índice refractivo	1,51
Índice de oxígeno límite (%)	17
Inflamabilidad	Si
Punto de fusión	110 °C

Algunas de las propiedades son relativamente insensibles al peso molecular, entre ellas la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la dureza y el módulo de Young; otras, como la resistencia a la tracción, la resistencia al choque, la resistencia al desgarramiento, el alargamiento en la rotura por tracción y la flexibilidad a temperaturas bajas, son sensibles al peso molecular. La elección del peso molecular necesario para diferentes usos significa que hay mayor facilidad para fabricar artículos con el material de peso molecular más bajo [42].

1.3.1.3.3. Propiedades químicas.

El polietileno es químicamente muy inerte. No se disuelve en ningún disolvente a temperatura ambiente. Pero líquidos tales como: el benceno, lo disuelven a temperaturas altas haciéndolo hincharse ligeramente. Tiene buena resistencia a ácidos y álcalis, por lo que se utiliza frecuentemente como recipiente para ácidos [42] (ver Tabla 4).

Tabla 4. Propiedades químicas del LDPE [42, 43].

RESISTENCIA QUÍMICA	
Ácidos concentrados	Aceptable
Ácidos diluidos	Buena
Álcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y aceites	Mala
Halógenos	Mala
Hidrocarburos aromáticos	Mala

La mayoría de los grados de polietilenos tienen una excelente resistencia química, lo que significa que no es atacado por ácidos fuertes o bases fuertes. También es resistente a los oxidantes suaves y agentes reductores. El polietileno se quema lentamente con una llama azul, que tiene una punta de color amarillo y desprende un olor a parafina. El material continúa ardiendo con la eliminación de la fuente de llama y produce un goteo. Este material generalmente se puede disolver a temperaturas elevadas en hidrocarburos aromáticos tales como tolueno o xileno [42].

El polietileno envejece expuesto a la luz y al oxígeno con pérdida de resistencia, alargamiento y resistencia al desgarro. El punto de ataque son los hidrógenos terciarios en las ramificaciones de la cadena. Los estabilizadores retardan su deterioro, siendo pocos compatibles con el LDPE (en cantidades mayores del 1%) para un efecto notable. En este material se produce también un entrecruzamiento cuando se calienta o se trabaja a temperaturas elevadas [42].

1.3.1.3.3.4. Propiedades eléctricas.

Las propiedades eléctricas del LDPE son muy buenas, probablemente próximas a las del politetrafluoretileno para su empleo en alta frecuencia (ver Tabla 5) [42,43].

Tabla 5. Propiedades eléctricas del LDPE [42, 43].

PROPIEDADES ELÉCTRICAS	
Constante dieléctrica 1MHz	2,2 – 2, 35
Factor de disipación a 1MHZ	$1 - 10 \times 10^{-4}$
Resistencia dieléctrica (kV mm ⁻¹)	27
Resistividad superficial (Ohm/sq)	10^{13}
Resistividad de volumen a (Ohm·cm)	$10^{15} - 10^{18}$

Estas propiedades no son especialmente sensibles a la humedad en virtud de la absorción muy pequeña de agua por el polietileno; pero el factor de potencia es probable que aumente si se somete el polietileno a la oxidación [43].

1.3.1.3.4. Aplicaciones.

Las características termoplásticas del LDPE permiten que tenga aplicaciones en: (ver Figura 13).

- Fabricación de juguetes.
- Producción de bolsas plásticas.
- Películas para invernaderos y usos agrícolas.
- Fabricación de utensilios desechables como platos, vasos y cubiertos.
- Botellas retornables.

- Recubrimiento y aislamiento de cables.
- Sacos de plástico.
- Películas estirables para procesos de empaque y embalaje [37].

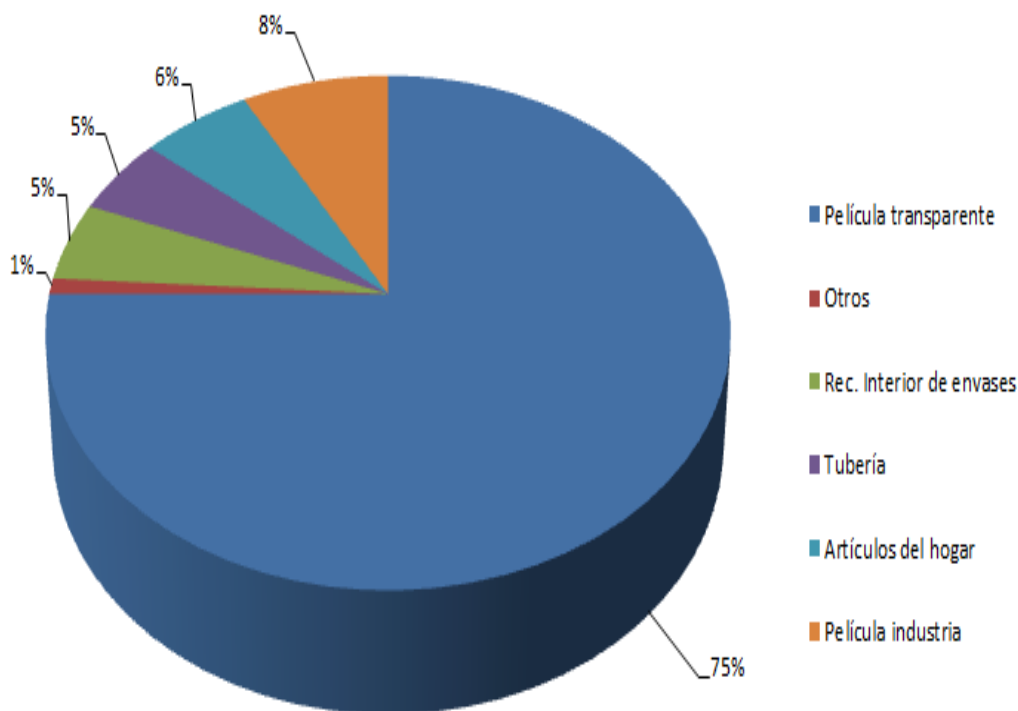


Figura 13. Aplicaciones del polietileno de baja densidad [37].

1.3.1.3.5. Consumo en México.

La fabricación de polietileno de baja densidad, ha aumentado rápidamente hasta el punto de hacer que este plástico sea el más producido en todo el mundo (34 millones de toneladas en 1990) [39].

Casi la mitad del LDPE producido durante los últimos años se ha destinado a utilidades como películas o láminas (ver Gráfica 2), por sus características de flexibilidad sin plastificantes, elevada resistencia al desgarro, a la humedad y a agentes químicos [43].

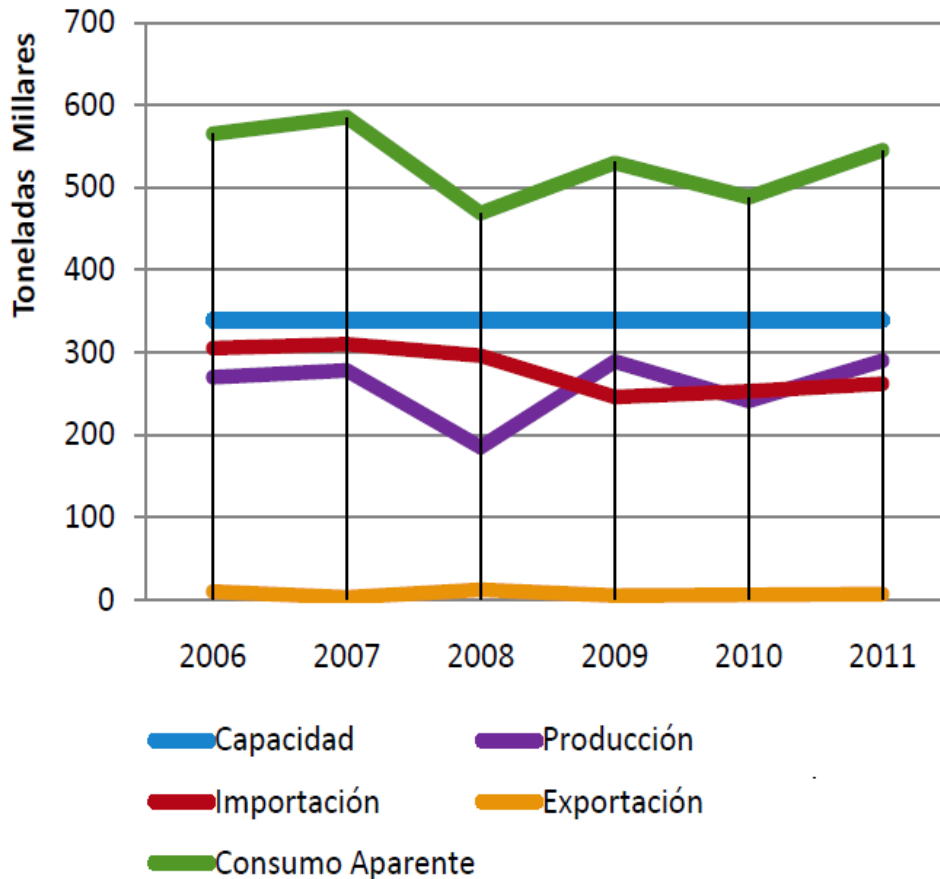


Gráfica 2. Usos del polietileno de baja densidad [44].

La gráfica 2 muestra que de los productos fabricados con LDPE el más utilizado es la película transparente con un 75%, lo que indica que tiene un alto grado de consumo.

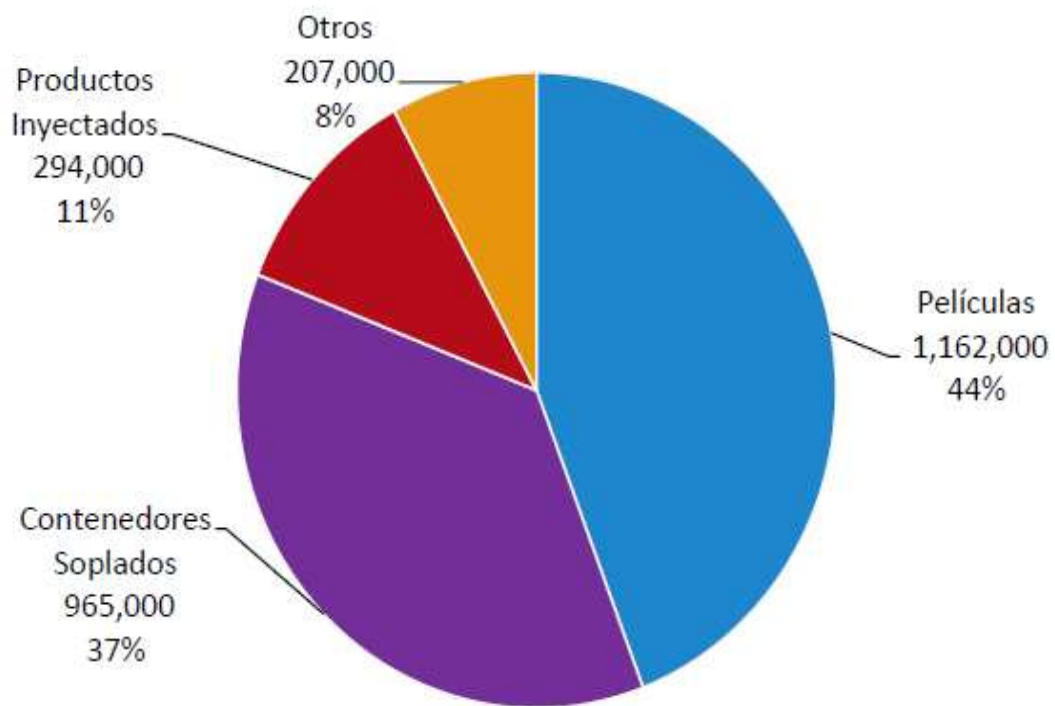
En 2007, se reportó que el consumo aparente de LDPE tuvo un aumento considerable ya que casi alcanzaba las 600 ton/año y para el 2008 tuvo un decaimiento por debajo de las 500 ton/año. Desde 2006 hasta 2011 en México se está produciendo un promedio de 266 ton/año lo cual no permite exportaciones de LDPE a otros países, más de la mitad de este material consumido en el país es

importado; sin embargo, se muestra que para el periodo 2009-2011 se importó menor cantidad de polietileno de baja densidad y su producción tuvo un aumento considerable (ver Gráfica 3) [45].



Gráfica 3. Situación del polietileno de baja densidad en México de 2006 a 2011 [45].

En el Distrito Federal y el Estado de México se encuentra la mayor parte de empresas dedicadas a los procesos de inyección y extrusión de polietileno de baja densidad. Los productos inyectados de LDPE alcanzan un tonelaje de 294,000 ton/año y la producción de película de este material 1,162000 Ton/año (ver Grafica 4) [45].



Gráfica 4. Producción de película de LDPE en México en el año 2011 [45].

Las tendencias globales del consumo del LDPE apuntan al desarrollo de nuevos productos que ofrezcan ventajas contra otros materiales plásticos o metálicos, ofreciendo oportunidades de sustituir la importación por la manufactura local ya que en la actualidad México depende el 55.2% de las importaciones de materias primas [45].

Capítulo II

PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE LDPE

2.1. Técnicas tradicionales de reciclaje de polietileno de baja densidad.

Existen diversos métodos en el tratamiento del reciclado de los plásticos, denominados: primario, secundario, terciario y cuaternario.

2.1.1. Tratamiento primario.

Consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este corresponde a un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos [46].

Habitualmente una planta de reciclado para producción de escama de plástico recibe fardos (paquete o bulto apretado) clasificados de botellas y embalajes plásticos y realiza las siguientes operaciones:

1. Alimentación de fardos. (Normalmente automática con ayuda de cintas transportadoras y carretillas cargadoras) [37] (ver Figura 14).



Figura 14. Desechos de polietileno en una planta recicladora [30].

2. Desembalado. (Suelta del fardo, puede ser automático o manual) [47].
3. Triado y clasificación (ver Figura 15). (Generalmente manual sobre una cinta y en la mayor parte de las ocasiones, complementada con detección automática de metales y plásticos no deseados) [47].



Figura 15. Separación manual de contaminantes de la película de LDPE [37].

4. Molienda gruesa. Consiste en la reducción de tamaño hasta 15 mm con molino de cuchillas.
5. Molienda fina. Es la reducción de tamaño hasta 8 mm, con molino de cuchillas [47] (ver Figura 16).



Figura 16. Disminución de tamaño del material plástico con un molino de cuchillas [37].

6. Limpieza. Consta de etapas sucesivas de lavado y centrifugado; la primera operación, se realiza con agua en lavaderos o bateas de lavado que a la salida llevan acoplada una centrífuga. Dependiendo del nivel de suciedad, esta etapa se puede duplicar o triplicar. Es durante este proceso que se logra separar al LDPE de otros materiales más densos que el agua como piedras, metales y otros plásticos [37].

El lavado con agua se puede complementar con un lavado químico, empleando agua a temperatura entre 50-70°C y a la que se le añaden productos químicos como sosa, que posteriormente se deben eliminar mediante una operación de enjuague [46].

7. Centrifugado para eliminación del agua de lavado. Posteriormente se pueden realizar una inspección visual de las escamas o eliminación manual de contaminantes.

Esta última etapa también puede ser realizada por equipos espectroscópicos, separadores magnéticos e imanes [46].

8. Almacenamiento en silo o salida a big-bag [46].

Las plantas recicladoras de envases plásticos se especializan en el tratamiento de un tipo de plásticos procedentes de envases, siendo los más frecuentes: PET (grupo 1), HDPE o PEAD (grupo 2) y LDPE o PEBD (grupo 3) [48].

La mayoría de plantas que reciclan polietileno de alta densidad lo tratan aisladamente pero también hay algunas que tienen líneas paralelas de este material junto con polietileno de baja densidad y los mezclan para mejorar las propiedades de los productos obtenidos [48].

Entre el HDPE y LDPE, el material HDPE, que es rígido, tiene un proceso de reciclado más sencillo que el LDPE ya que este último cuando viene en presentación de película necesita procesos específicos de triturado y aglomerado (ver Figura 17) [48].



Figura 17. Envase de HDPE y película de LDPE utilizadas para reciclarse [48].

En las líneas de LDPE, la molienda se sustituye por un guillotinado realizando el aglomerado del material en equipos denominados agrumadores o densificadores en donde las hojuelas plásticas se aglomeran aumentando la densidad aparente del material. La planta procesa la escama de plástico hasta obtener granza y se añaden las siguientes operaciones [37, 39, 46]: (ver Figura 18).

- Secado de escama: (acondicionamiento del material con aire caliente para rebajar la humedad antes de procesarlo).
- Mezcla de materiales plásticos de diferentes grados: adición de aditivos o introducción de cargas minerales para lograr determinadas propiedades en el producto.
- Extrusión y granceado: extrusión y pelletizado (en extrusora de corte en cabeza).
- Almacenamiento en silo o salida a big-bag, dispuesto en bolsas de 25kg.

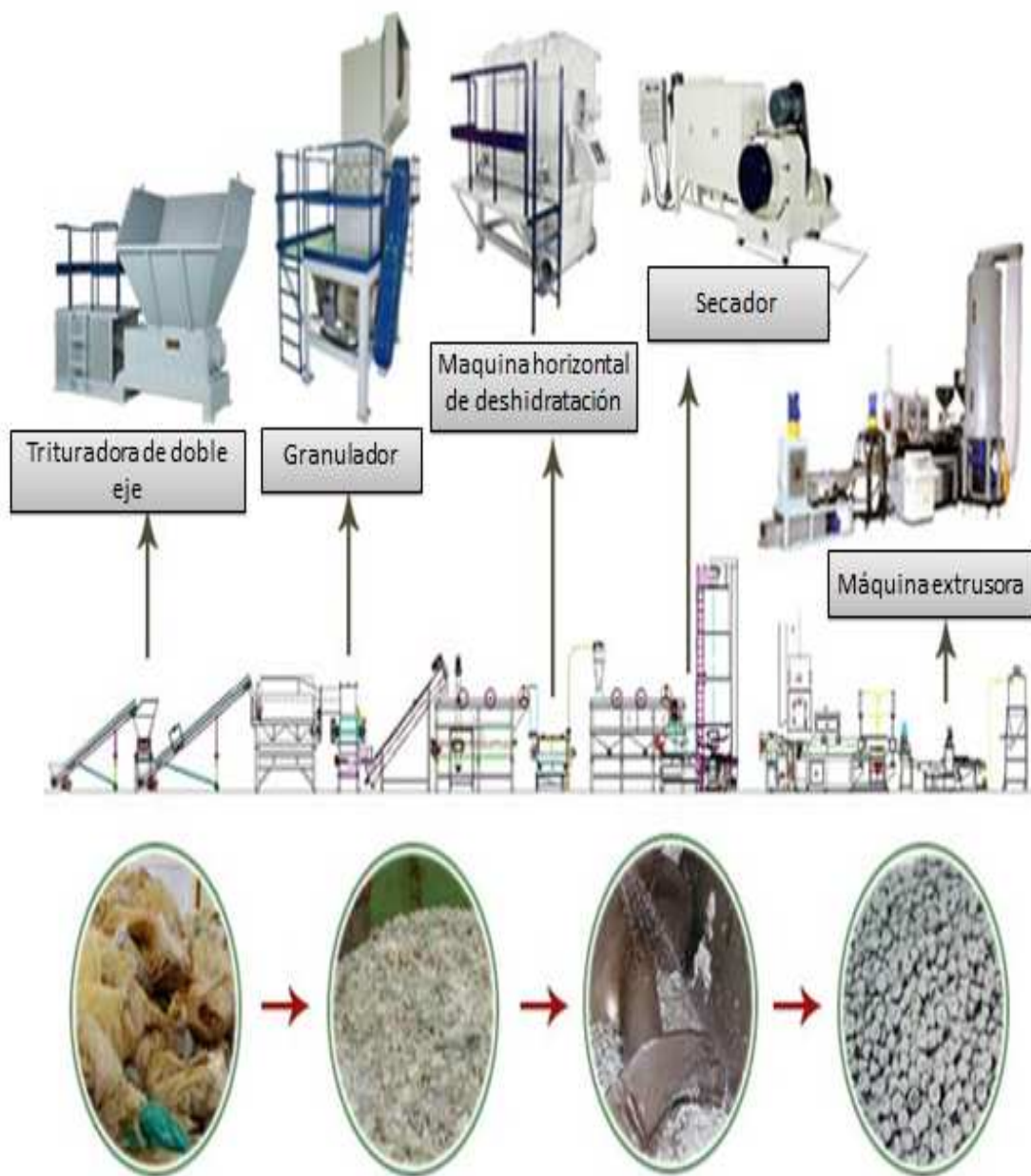


Figura 18. Proceso esquemático del reciclado de LDPE para formar pellets [37].

Los productos reciclados por este tratamiento provienen de procesos de fabricación de la industria petroquímica como: de la transformadora, y de los residuos sólidos urbanos [49].

2.1.2. Tratamiento secundario.

Consiste en la fusión de los desechos plásticos, son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor aplicación los cuales son diferentes al plástico original en un proceso a escala [46].

Los desperdicios obtenidos requieren de estar libres de contaminación(aceites, detergentes y azúcar). Estos generalmente requieren de un proceso de lavado posterior a la molienda para lograr un granulado de buenas características [20].

2.1.3. Reciclado terciario o químico.

Persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integradas a la industria petroquímica. Los métodos pueden ser térmicos o químicos, los más utilizados son:

- Degradación térmica.
- Pirolisis.
- Conversión catalítica.
- Gasificación.

Algunas ventajas y desventajas de utilizar este tipo de reciclado se muestran en la tabla 6 [46].

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje químico para el LDPE [50].

Proceso	Ventajas	Desventajas
DEGRADACIÓN TÉRMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Se utiliza para mezclas de residuos cuya separación es inviable. 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay viabilidad comercial. • Aumento de la producción de gas frente a la disminución de rendimiento de líquidos y sólidos.
PIRÓLISIS	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de hidrocarburos y compuestos aromáticos. • Productos obtenidos metano, etileno, propileno, benceno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de energía(500- 1000°C). • Los productos resultantes pueden degradarse al sufrir reacciones secundarias (como craqueo de volátiles).
CONVERSIÓN CATALÍTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Permite trabajar a temperaturas bajas. • Mayor selectividad en compuestos finales de acuerdo al catalizador (normalmente se utilizan catalizadores ácidos como la Zeolita). 	<ul style="list-style-type: none"> • Los catalizadores producen una variación en los mecanismos que afecta el rendimiento y selectividad de los productos.
GASIFICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Se produce gas de síntesis y mezcla de monóxido de carbono e hidrogeno. 	

2.2. Posibles usos alternativos para productos fabricados a partir de LDPE reciclado.

La densidad del polietileno de baja densidad reciclado disminuye debido al rompimiento de cadenas moleculares, esto reduce la resistencia a la tensión y elongación, por lo que no es recomendable que se use para la fabricación de películas [20].

Este material después de ser recuperado puede ser utilizado en:

- a) Cables. En esta aplicación, la escasa y la resistencia al agua son de especial utilidad, para fabricar cables de alta frecuencia utilizados especialmente en instalaciones de radar. El polímero también se usa como envoltura exterior y no como aislante eléctrico, en este caso se considera sustituto del plomo [53] (ver Figura 19).



Figura 19. Aislante eléctrico de LDPE reciclado [37].

- b) Envases, vasijas y tubos. El LDPE se usa mucho en forma de botellas, vasos y otros recipientes, tanto en la industria para la manipulación de materias corrosivas como en el hogar para diversos líquidos.

En esas aplicaciones, las principales ventajas son la inercia, el poco peso y la menor probabilidad de que se rompa, comparado con el vidrio [37] (ver

Figura 20).



Figura 20. Tubo fabricado con LDPE reciclado [37].

- c) Tubos de pared gruesa. Se usan para el transporte de agua especialmente en las granjas y en las minas, donde la facilidad de colocar las tuberías, la resistencia a las condiciones corrosivas del suelo y el poco peso son factores importantes [53] (ver Figura 21).



Figura 21. Tubo de pared gruesa elaborado con LDPE [37].

- d) Filamentos. El bajo punto de fusión del polietileno limita su uso como fibra textil, pero se hacen tejidos para tapicería automotriz con monofilamentos. Los filamentos se usan en estado estirado en frío, pero tiene la limitante de aflojamiento causado por temperaturas elevadas [53](ver Figura 22).



Figura 22. Filamento de LDPE reciclado [37].

- e) Instalaciones químicas. El polietileno de baja densidad se usa para la construcción de instalaciones químicas en las cuales se necesita cierta resistencia a productos como ácidos [53] (ver Figura 23).



Figura 23. Instalaciones químicas con partes plásticas elaboradas con LDPE reciclado [37].

Capítulo III

MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Material, reactivos y equipo.

3.1.1. Material.

- Matraz de bola de 500 mL.
- Matraz Kitazato de 500 mL y de 1000mL.
- Mangueras de látex.
- Embudo Büchner.
- Vasos de precipitado de 400 mL.
- Papel filtro y papel parafilm.

3.1.2. Reactivos.

- Envases Tetra Pak (Lácteos, jugos).
- Aceite vegetal requemado (grado alimenticio) obtenido por recolección.
- Cloroformo (pureza de 99.9%, FERMONTE).
- Agua de la llave sin tratamiento previo.

3.1.3. Equipo.

- Termómetro Brannan.
- Parrilla ThermoCientific marca CIMAREC.

- Refrigerante recto.
- Cronómetro.
- Bomba de recirculación.
- Mufla LINDBER/BLUE.
- Lavadora para ropa manual marca IEM LIC20TI 20 Kg.

3.2. Metodología.

3.2.1. Diagrama de flujo.

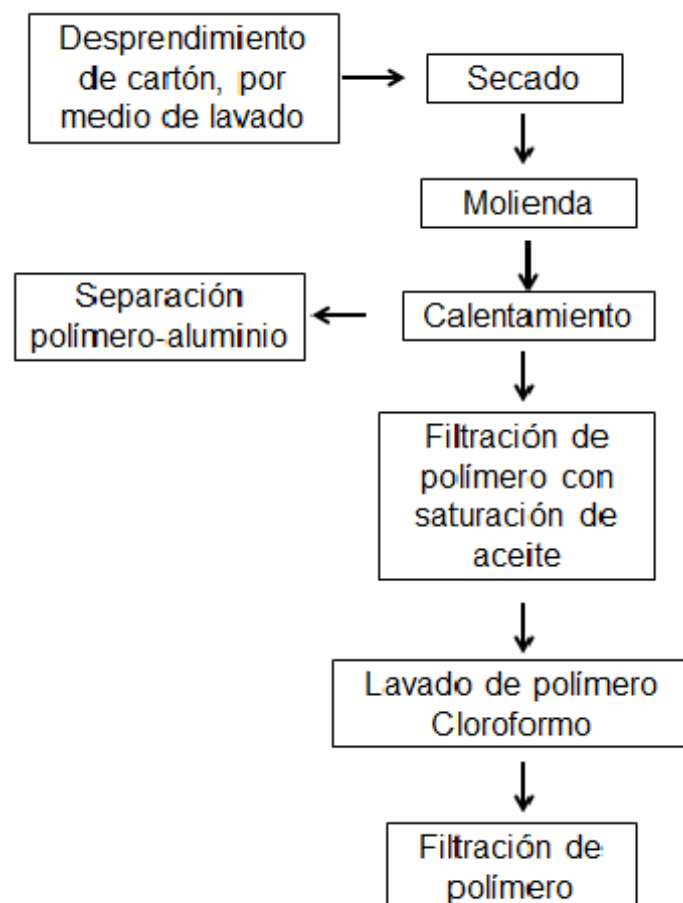


Diagrama 1. Pasos que se llevaron a cabo durante el desarrollo del presente trabajo.

3.3.2. Descripción del proceso de separación Aluminio-polímero.

Se tomó como base el proceso de separación aluminio-polímero, en el cual se utilizó: desecho de Tetra Pak, aceite vegetal requemado, y etanol [3]; sin embargo, se realizaron modificaciones al proceso con la finalidad de obtener mayor cantidad de polímero.

Durante el desarrollo de recuperación del polietileno de baja densidad se registraron 5 procesos tomados aleatoriamente para verificar que los resultados sean confiables y que el proceso al ser replicado no tenga variaciones significativas. Los resultados finales fueron analizados en el programa estadístico SPSS 18 versión en español, utilizando la prueba de Wilcoxon.

3.2.2.1. Modificación y réplicas del proceso.

3.2.2.1.1. Desprendimiento de cartón por medio del lavado.

El Tetra Pak recolectado fue cortado transversalmente de modo que quedara en forma de lámina (ver Figura 24). A este se le realizó un lavado previo a la molienda, para desprender la capa de cartón que envuelve al envase flexible.



Figura 24. Envase Tetra Pak cortado transversalmente para formar una lámina.

Las láminas de Tetra Pak fueron colocadas dentro de una lavadora para ropa (marca IEM, utilizada como hidropulper), y 15L de agua potable. Las láminas estuvieron en agitación durante un tiempo de 10 min a temperatura ambiente (ver Figura 25), posteriormente se retiraron y los residuos de papel fueron filtrados para poder utilizar el agua nuevamente.



Figura 25. Desprendimiento del cartón de los envases Tetra Pak por medio de un lavado.

El Tetra Pak se dejó secar a temperatura ambiente expuesto al sol durante 24 h. Después del lavado la lámina quedó libre de cartón para posteriormente ser molida (ver Figura 25). Para fines de referencia, se seguirá utilizando el término Tetra Pak para indicar el material compuesto de polímero y aluminio.



Figura 26. Lámina de Tetra Pak libre de cartón.

3.2.2.1.2. Molienda.

Las láminas fueron cortadas en cuadros para disminuir su tamaño, posteriormente fueron trituradas en un molino manual para grano (tipo toolcraft TC2541), (ver Figura 27).



Figura 27. Molienda de Tetra Pak.

El proceso de molienda se hizo seis veces dentro del molino ya que la muestra se requiere pulverizada para poder separar el LDPE adherido a la capa de aluminio con mayor facilidad (ver Figura 28).



Figura 28. Tamaños de la muestra de Tetra Pak obtenidos después de la molienda.

3.2.2.1.3. Separación del polímero por medio de un calentamiento.

Se realizó dentro de una mufla LINDBER/BLUE la cual sirvió como aislante de temperatura. Se hizo una mezcla con 100g de aceite vegetal requemado y 10g de Tetra Pak molido dentro de un vaso de precipitado de 250mL (ver Figura 29), la mezcla realizada para cada uno de los procesos tiene un peso total de 110g.



Figura 29. Materiales con los que se realiza el proceso de separación de LDPE.

La mezcla fue introducida en la mufla sin agitación a una temperatura de 140°C durante un tiempo de 120 min, finalizando el tiempo de calentamiento el aceite fue transferido a un vaso de precipitado a temperatura ambiente, lo que permitió que se separara el aluminio del aceite en el cual se encontraba disuelto el polímero (ver Figura 30).



Figura 30. Aluminio obtenido después del calentamiento.

3.2.2.1.4. Filtración del polímero con saturación de aceite.

El aceite se dejó enfriar durante 120min a temperatura ambiente. Posteriormente se realizó una filtración en un sistema de vacío, que dura aproximadamente 40min para obtener así el polímero (LDPE). Para la cual se utilizó un matraz Kitazato de 1000mL, una manguera de látex, papel filtro y un embudo Büchner, (ver Figura 31).



Figura 31. Filtración del aceite que contiene el polímero.

3.2.2.1.5. Lavado del polímero.

El polímero obtenido aún tenía restos de aceite por lo que se llevó a cabo un lavado.

Se realizó por medio de la técnica de reflujo, la cual consiste principalmente en evitar la pérdida del disolvente por evaporación [54]. Se utilizó un matraz de bola de 500 mL, un refrigerante recto, una bomba de recirculación, mangueras de látex y una parrilla de calentamiento (ver Figura 32).



Figura 32. Etapa de lavado del LDPE obtenido a partir de envases Tetra Pak.

Se colocó el LDPE con saturación de aceite dentro del matraz de bola junto con cloroformo, se le adicionó un agitador magnético (las cantidades para cada uno de los procesos registrados se observan en la tabla 7).

Tabla 7. Cantidades de material utilizado para cada uno de los lavados de polímero.*

Muestra	Cloroformo (g)	Polímero (g)	Total (g)
1	40	20.475	60.475
2	38	18.79	56.79
3	40	19.542	59.542
4	40	19.854	59.854
5	42	20.901	62.901

*Nota. Cantidades de cloroformo y polímero utilizadas para cada uno de los procesos, el LDPE utilizado es el recuperado después de la filtración del aceite. Esta parte del proceso se realizó a una escala de 1:2, por este motivo la cantidad de cloroformo varió en cada uno de los procesos.

El lavado se realizó con una temperatura de 62°C (se eligió la temperatura por el punto de ebullición del cloroformo) durante 30min con una velocidad de agitación de 12 rpm controlada por la parrilla de calentamiento. Al finalizar el lavado se permitió un tiempo de enfriamiento de 30min.

3.2.2.1.6. Filtrado del polímero después del lavado.

La filtración se llevó a cabo por un sistema de vacío por 2h. Se utilizó un matraz Kitazato de 500mL, una manguera de látex, papel filtro y un embudo Büchner (ver Figura 33).



Figura 33. Filtración del polímero después de ser lavado con cloroformo.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen y se discuten los resultados obtenidos al realizar el proceso de recuperación de polietileno de baja densidad descrito en cada punto de la metodología.

4.1. Proceso de separación Aluminio-polímero.

4.1.1. Desprendimiento del cartón.

El resultado del corte transversal que se le hizo al Tetra Pak; propició que el desprendimiento del cartón fuera más rápido y evito que la capa de LDPE adherida al aluminio se fuera a rasgar. Al obtener la lámina de Tetra Pak entera facilito hacer la disminución de su tamaño. Esta lámina fue secada a exposición del sol durante 24h debido a que si se realizaba dentro de una estufa el LDPE sufre degradación en su estructura debido a la temperatura, ya que este polímero plástico funde a temperaturas muy bajas [42].

4.1.2. Molienda.

La morfología del Tetra Pak después de la molienda es irregular, y el tamaño de partícula mide aproximadamente .915mm (determinada por un comparador óptico). El resultado de la reducción de tamaño de partícula, propicio que la mezcla (Tetra Pak-aceite) fuera homogénea lo cual facilitó el desprendimiento del LDPE contenido en la muestra.

4.1.3. Separación por medio de un calentamiento.

La separación del LDPE adherido al aluminio se efectuó en mezcla con aceite vegetal requemado a lo cual se le aplicó temperatura de 140°C, y se introdujo en un medio que aisló totalmente la temperatura (Mufla) evitando que esta se perdiera. Esto dio como resultado que el LDPE fundiera y quedara totalmente homogéneo con el aceite y no se pudiera diferencial uno del otro.

Con el tiempo de enfriamiento se observó que el aceite comenzaba a tener una consistencia más viscosa hasta que llegó el punto en el que su aspecto era el de un gel ceroso al tacto de color amarillo tenue (ver Figura 34).



Figura 34. Polietileno de baja densidad mezclado con aceite.

4.1.4. Filtración del polímero con saturación de aceite.

La filtración de la mezcla dentro de un sistema a vacío, dio como resultado la separación del LDPE del aceite, sin embargo; la separación de estos dos materiales no fue totalmente, ya que se formó una masa amarilla que asemeja trozos de cera, esto indica que el LDPE aun contiene aceite en su estructura (ver Figura 35). Por lo que se prosiguió a realizar un lavado con un disolvente el cual removiera el aceite de la estructura del polímero plástico (LDPE).



Figura 35. Polímero recuperado con saturación de aceite.

4.1.5. Lavado del polímero.

El LDPE obtenido de las muestras de Tetra Pak fue sometido a una etapa de lavado; tal como se describe en el punto 3.2.2.1.5 de la metodología.

El LDPE se obtuvo con una morfología granular irregular con un tamaño máximo promedio de 2mm de diámetro (ver Figura 36).



Figura 36. LDPE después de ser lavado con cloroformo.

Según lo reportado en bibliografía, el LDPE es un sólido blanco y translúcido, tenaz y flexible a temperaturas ordinarias, y tiene una superficie blanda que puede rayarse con facilidad, y comienza a fundirse a unos 110°C, transformándose en un líquido transparente [37].

Se tomó una muestra de 10 g del material recuperado sometiéndose a un rango de temperatura que osciló entre los 110°C y 140°C, se observó que al llegar la temperatura arriba de los 110°C este comenzó a fundir tomando un color transparente grisáceo, al enfriar quedó un material plástico el cual fue presionado con las manos obteniendo cierta flexibilidad (ver Figura 37) .Por lo que el material obtenido al final del proceso tiene semejanza al polietileno de baja densidad de acuerdo a sus características físicas.



Figura 37. Muestra de LDPE fundido.

4.2. Cantidad final de LDPE.

La literatura reporta que los envases Tetra Pak están conformados por: [15,19]

- a) Cartón 75%.
- b) Polietileno de baja densidad 20%.
- c) Aluminio 5%.

La muestra de Tetra Pak utilizada como materia prima para el desarrollo de la recuperación de LDPE tiene un peso total del 40g. En esta cantidad de muestra, la proporción que se encuentra cada uno de los componentes es de: 30g de cartón, 8g de LDPE y 2g de Al.

Como se ha descrito en la metodología, el cartón presente en el envase de Tetra Pak es fácilmente desprendido por lavado; no sucede lo mismo con el LDPE y el Al ya que estos van adheridos fuertemente entre ellos. En consiguiente fue posible utilizar solamente LDPE y Al, tomándolo como la muestra de estudio; siendo un total de 10g. Donde la proporción de muestra de LDPE y Al en 10g es la siguiente:

- 8g de LDPE.
- 2g de Aluminio.

Se tiene que por cada muestra existe la posibilidad de recuperar 8g de LDPE, sin embargo; este resultado puede variar debido a la presencia de pequeñas cantidades de aluminio, aceite o algunas impurezas presentes en el LDPE.

La tabla 8 muestra las cantidades de LDPE recuperadas después de la etapa de lavado con cloroformo.

Tabla 8. Cantidades de LDPE obtenidos por cada muestra después de ser lavado con cloroformo.

Muestra	LDPE (g)
1	17.787
2	16.988
3	17.206
4	18.296
5	18.74

En la tabla 9 se presentan las cantidades resultantes de LDPE, sin embargo; se puede ver que estas sobrepasan la cantidad límite de lo que se puede recuperar por cada 10g de muestra, por tal motivo se observó el material de LDPE fundido (ver Figura 37) y se encontró que aún tiene restos de aceite. Para conocer la cantidad promedio de aceite contenida en el LDPE se hizo un cálculo, el cual fue obtenido a partir del 80% de polietileno de baja densidad presente por cada 10g de muestra que corresponde a: 6.4g netos del material de interés (LDPE) presente. (Tabla 9).

Tabla 9. Cantidades totales de LDPE recuperado y aceite presente en cada muestra.

Total de muestra	Total de aceite	Total de muestra (LDPE+AI)	LDPE presente en la muestra	LDPE obtenido después de la etapa de lavado	Total de LDPE recuperado	Aceite presente en el LDPE después de ser lavado con cloroformo
110g	100g	10g	8g	17.787g	6.4g	11.383g
110g	100g	10g	8g	16.988g	6.4g	10.532g
110g	100g	10g	8g	17.206g	6.5g	10.66g
110g	100g	10g	8g	18.296g	6.4g	11.892g
110g	100g	10g	8g	18.74	6.5g	12.181g

La tabla 9 expone la cantidad total de LDPE recuperado, se estima que por cada muestra se obtiene un promedio de 6.4g de LDPE. Este promedio se obtuvo al aplicar la siguiente formula:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \dots \dots \dots 1$$

Aplicando la fórmula 1:

$$6.4+6.4+6.5+6.4+6.5=322$$

$$322/5=6.4$$

La cantidad de aceite presente en el LDPE recuperado corresponde aproximadamente a un 14%, y esto puede ser debido a que el lavado que se realizó con cloroformo no fue suficiente para que este se removiera completamente.

También su causa se puede deber a que las cadenas poliméricas y las cadenas del aceite vegetal son afines en cuanto a su estructura ya que los dos materiales tienen características químicas similares, dado que los triglicéridos (parte fundamental de los aceites vegetales) son moléculas de baja reactividad y sus dobles enlaces internos permiten la introducción de grupos reactivos que facilita que se lleve a cabo un proceso de polimerización [57].

4.3. Porcentaje total de aceite.

En el presente trabajo, el aceite reusado es un material de valor secundario; sin embargo, se tiene la necesidad de conocer la cantidad recuperada después de haber concluido con la recuperación del LDPE, ya que este aceite será reutilizado para un mismo fin en otros procesos.

La cantidad de aceite para cada muestra fue la misma, en cada uno se utilizaron 100g de este material, sin embargo su recuperación no fue al 100% (ver Tabla 10).

Tabla 10. Cantidad total de aceite recuperado en las etapas del proceso (Calentamiento y lavado de LDPE).

Muestra	Aceite recuperado después del calentamiento (g)	Aceite recuperado después del lavado de polímero (g)	Total (g)
1	79.533	2.688	82.221
2	81.21	1.802	83.012
3	80.548	2.246	82.794
4	80.146	1.558	81.704
5	79.099	2.161	81.26

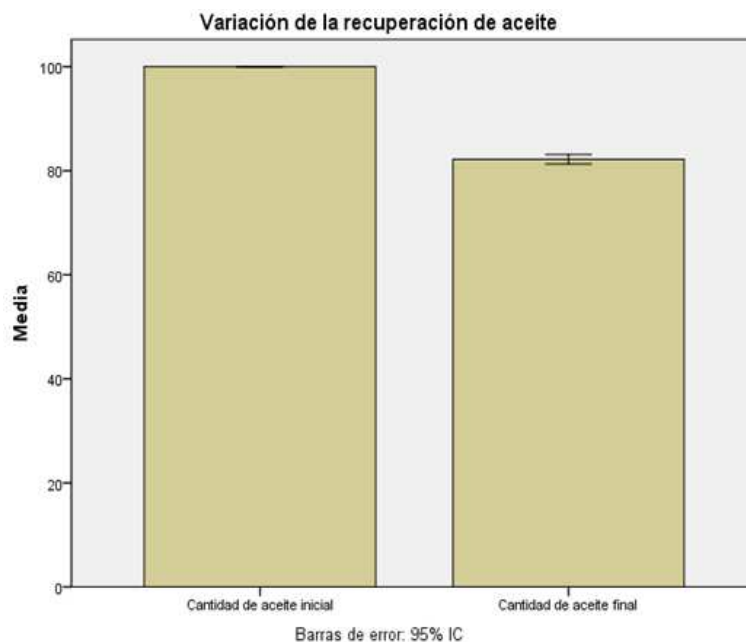
Se muestra la sumatoria total de aceite recuperado correspondiente a cada una de las muestras registradas, en las cuales se utilizaron 100g al iniciar el proceso. Se observa en la columna 4 que existen pérdidas las cuales pudieron ser causadas por acumulación de este en el aluminio desprendido de la muestra Tetra Pak (ver Figura 38), por la adherencia del aceite en los vasos de precipitado y como se ha mencionado anteriormente el acumulado en el LDPE recuperado.



Figura 38. Aluminio con saturación de aceite.

El aceite recuperado después del lavado del LDPE se muestra en la columna 3 de la tabla 10. Este fue recuperado de la mezcla con cloroformo, se realizó por separación de densidades. No se pudo hacer de hacer por medio de evaporación ya que el cloroformo es muy volátil.

También se toma en cuenta que el aceite aún presente en el LDPE recuperado no se ha cuantificado por completo por lo que se realizó la prueba de Wilcoxon con un error de confiabilidad del 95% tomando en cuenta solamente el aceite recuperado de la etapa de calentamiento y de la etapa de lavado para obtener la variación de pérdida (ver Gráfica 5)



Gráfica 5. Comparación de la cantidad de aceite al inicio del proceso con la cantidad de aceite al finalizar el proceso.

La gráfica 5 muestra que la media de aceite recuperado es de 82.198%, la prueba de (Wilcoxon) establece que en el proceso sí hay variaciones con respecto a la recuperación del aceite ya que se encontró una significancia de $0.043 \leq 0.05$, lo cual indica que existe una variación significativa en la pérdida de aceite con

respecto al inicial y el obtenido al final del proceso, sin embargo, se esperaba recuperar solo el 50% de aceite por lo que se puede decir que el proceso utilizado para del aluminio-polímero es viable.

4.4. Porcentaje final de cloroformo recuperado.

El cloroformo utilizado para lavar el polímero fue recuperado y a su vez reusado en otros procesos para el mismo fin (ver Figura 39). En cada proceso de lavado se estima una evaporación causada en la etapa de filtración después de limpiar el LDPE ya que durante el calentamiento la técnica de reflujo no permite la escapatoria de vapores.



Figura 39. Cloroformo recuperado después de la filtración.

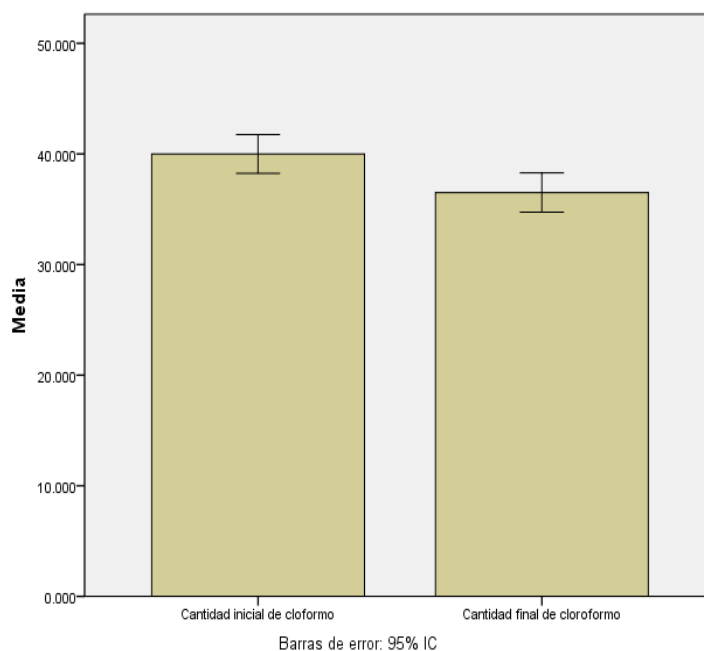
La cantidad de cloroformo utilizado al principio de la etapa del lavado del LDPE no es la misma para cada proceso debido a que depende de la cantidad de LDPE que se requiera limpiar. Para tal efecto, se hicieron varias pruebas con distintas cantidades de disolvente y la mejor y más viable es agregando el doble de cloroformo a la etapa de lavado o utilizar para esta parte del proceso una escala de 1:2 ya que esto permite hacer solo un lavado en un tiempo de 30 min. La tabla

11 muestra las cantidades de cloroformo al principio de la etapa de lavado y al final de esta.

Tabla 11. Cantidad total de cloroformo recuperado por cada muestra.

Muestra	Cloroformo al inicio de la etapa de lavado (g)	Cloroformo recuperado(g)
1	40.000	35.600
2	38.000	36.867
3	40.000	36.345
4	40.000	34.998
5	42.000	38.723

Para saber si existen diferencias en la cantidad de cloroformo utilizado inicialmente y la cantidad de cloroformo recuperado, se realizó la prueba de Wilcoxon con un error de confiabilidad del 95% (ver Gráfica 6).



GRÁFICA 6. Media del cloroformo inicial y del recuperado durante el proceso.

La prueba de Wilcoxon reveló que existen diferencias significativas en la cantidad inicial y la cantidad recuperada del cloroformo utilizado en el proceso ($0.043 \leq 0.05$), esto indica que por cada proceso se está perdiendo de 4.3% de cloroformo debida a evaporación.

Capítulo V

CONCLUSIONES

El proceso de recuperación de polietileno de baja densidad ha sido desarrollado para obtener este material que es considerado de desecho de una forma sustentable y con un costo bajo, mediante la realización de este trabajo se obtuvo las siguientes conclusiones:

- El desprendimiento del cartón por medio del lavado, permite obtener durante la molienda partículas de menor tamaño (promedio de 0.915mm) en comparación de hacerlo de forma directa.
- Las partículas entre más pequeñas sean facilitan la separación del LDPE adherido al Al.
- Con la aplicación de temperatura a la mezcla (muestra-aceite), se da la separación del LDPE pegado al aluminio; sin embargo, la temperatura debe ser controlada; ya que si se tienen variaciones, el LDPE puede degradarse o su separación se dificulta.
- La filtración a través de un sistema de vacío ayuda a desprender el aceite contenido en el LDPE y permite recolectar nuevamente el aceite para un uso posterior, el cual tiene el mismo fin.
- La limpieza del LDPE no fue suficiente con un lavado o probablemente el disolvente utilizado no tiene las propiedades necesarias que se requieren para desprender el aceite del polímero.
- El peso promedio recuperado de LDPE es de 6.4g que corresponde al 80% de la cantidad de LDPE presente en la muestra.
- La metodología empleada resulta viable para la recuperación de LDPE; sin embargo, siempre es posible plantear procesos de mejora.

Capítulo VI

RECOMENDACIONES

- Hacer la cuantificación de aceite y Al, presentes en el LDPE recuperado.
- Caracterizar el polietileno de baja densidad obtenido a través de técnicas específicas como el TGA.
- Analizar las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad.
- Utilizar algún otro disolvente para el lavado del LDPE.
- Hacer un estudio de mercado donde se puedan analizar los costos y utilidades del proceso.
- Establecer métodos de recolección de aceite reusado y de empaques flexibles Tetra Pak.
- Incrementar las cantidades de materia prima para el proceso, para poder establecer una planta piloto.

Capítulo VII

ANEXOS

Anexo I

Propiedades moleculares básicas del LDPE [37].

PROPIEDADES FÍSICAS	SI SE AUMENTA LA DENSIDAD (CRISTALINIDAD ENTRE 0,915 Y 0,938)	SI SE AUMENTA LA MASA MOLECULAR PROMEDIO SE DISMINUYE EL ÍNDICE DE FUSIÓN	SI SE HACE MÁS ESTRECHA LA DISTRIBUCIÓN DEL PESO MOLECULAR
Viscosidad de la masa fundida	Más elevada	Más elevada	Ligeramente mayor
Punto de ablandamiento	Mucho mayor	Ligeramente mayor	Ligeramente mayor
Resistencia al estiramiento	Mucho mayor	Ligeramente mayor	-----
Resistencia a la tracción en rotura	Ligeramente menor	Más elevada	Ligeramente mayor
Elongación en rotura	Menor	Más elevada	-----
Rigidez a la flexión	Mucho mayor	Ligeramente mayor	-----

Flexibilidad	Menor	-----	-----
Dureza	Mucho mayor	Ligeramente mayor	-----
Contracción	Más elevada	Más elevada	-----
Deformación	Ligeramente mayor	Más elevada	Más elevada
Resistencia al impacto (Tenacidad)	Menor	Más elevada	-----
Transparencia	Más elevada	menor	-----
Resistencia al pegado entre si y al molde	Más elevada	Ligeramente mayor	-----
Propiedades eléctricas	Ligeramente mayor	No afecta	No afecta

Anexo II

Parámetros que influyen en la composición y rendimiento de los productos químicos resultantes de un proceso de pirolisis.

1. Composición. El espectro de los productos pirolíticos obtenidos depende claramente de la composición. Por ejemplo en un aumento del porcentaje de polietileno en una mezcla con madera produce menor cantidad de líquidos y gas mientras que aumenta la fracción sólida y su poder calórico [55].
2. Temperatura. Es una de las variables determinantes junto con la velocidad de calentamiento. La temperatura favorece la ruptura de las moléculas complejas para dar lugar a otras más sencillas [56].
3. Humedad. Por término medio la pirolisis de partículas húmedas, tiene lugar a temperatura más baja de la fijada puesto que parte del calor suministrado [56].
4. Velocidad de calefacción. Velocidad correspondiente al tiempo necesario para que las partículas se calienten desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de completa descomposición [58].
5. Tiempo de residencia. Los tiempos de residencia elevados originan mayores rendimientos de gases, puesto que favorecen las reacciones de craqueo [59].
6. Cantidad de muestra. Las modificaciones en el peso de la muestra influyen más directamente sobre la transferencia de material y calor en el reactor que sobre los mecanismos químicos [60].
7. Tamaño de partícula. El tamaño de partícula puede influir en la transmisión de calor. Por lo que las partículas de mayor tamaño no se calientan rápidamente y las pequeñas se sobrecalientan o son arrastradas por el gas [60].

GLOSARIO

- **Amorfo:** cuerpo cuyas partículas o moléculas forman una estructura interna desordenada.
- **Ångström (Å):** unidad de longitud empleada principalmente para expresar longitud de onda, distancias moleculares y atómicas
- **Análisis dinámico mecánico diferencial (DMTA):** es un análisis utilizado en estudios de procesos de relajación y en reología, para estudiar y caracterizar el comportamiento de materiales viscoelásticos como polímeros y sus respuestas ante impulsos, estrés, deformación en tiempo y frecuencia.
- **Ángulo de enlace:** ángulo de unión entre los átomos de una molécula. De acuerdo al ángulo de enlace que posean, se va a determinar la estructura geométrica de la molécula.
- **Calorimetría de barrido diferencial (DSC):** técnica termoanalítica en la que la diferencia de calor entre una muestra y una referencia es medida como una función de la temperatura.
- **Catalizadores:** sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos, y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma.
- **Cristalino:** cuerpo cuyas partículas o moléculas forman una estructura interna ordenada.
- **Esferulitas:** aglomeraciones de cristales con forma de esfera y son del orden de 0.1mm. Como los cristales tienen forma de placa estas se van pegando unas con otras, este proceso da lugar a q se ensanche la periferia y se dé lugar a una esfera.
- **Estanqueidad:** propiedad de impermeabilidad de una estructura o mecanizado para evitar la entrada o salida de un fluido.

- **Estructura molecular:** distribución de los átomos en un compuesto por medio de los enlaces químicos.
- **Extrusión:** proceso utilizado para crear objetos plásticos con sección transversal definida y fija.
- **Masa molecular:** es la masa de una molécula de un compuesto. Se calcula sumando las masas atómicas relativas de todos los átomos que forman dicha molécula.
- **Orientación biaxial:** se manifiesta cuando una película o lámina es estirada en más de una dirección, normalmente en dos direcciones a 90°.
- **Polietileno:** termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes.
- **Polímero:** producto formado por moléculas caracterizadas por la repetición de múltiples grupos de átomos (unidades estructurales) unidos entre sí en cantidad suficiente como para proporcionar un conjunto de propiedades que no varían prácticamente con la adición o eliminación de una o unas pocas de sus unidades estructurales.
- **Probeta:** trozo o parte de una muestra utilizada para llevar a cabo una prueba, con forma y dimensiones específicas.
- **Residuos sólidos urbanos (RSU):** son los que se originan en la actividad doméstica y comercial de ciudades y pueblos.
- **Rotomoldeo:** es un proceso de conformado de productos plásticos en el cual se introduce un polímero en estado líquido o polvo dentro de un molde y éste, al girar en dos ejes perpendiculares entre sí, se adhiere a la superficie del molde, creando piezas huecas.
- **Suaje:** (llamado también Troquel) es una herramienta confeccionada con placa de acero para cortar, doblar o marcar materiales blandos.
- **Tectán:** aglomeración de polietileno mezclado con aluminio.
- **Temperatura de transición vítrea (Tg):** en esa temperatura el polímero aumenta su densidad, dureza y rigidez, además su porcentaje de elongación disminuye de forma drástica.

- **Termoformado:** proceso en el que una lámina de cualquier polímero termoplástico es calentada hasta llegar a un estado ahulado, quedando apta para su deformación. Seguidamente esta lámina plástica se coloca sobre el molde con la forma deseada y se succiona con vacío contra éste, para que copie exactamente su forma, obteniendo la pieza plástica.
- **Termoplástico:** es un plástico que, a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.
- **Tetra Pak:** empresa multinacional fundada en Suecia, que diseña y produce soluciones de envasado de cartón y procesamiento para la industria alimenticia.

REFERENCIAS

- [1] Laguna O. (1992). Reciclado, Revista de los plásticos modernos,63, 65-67.
- [2] Rodriguez I. (2011). Tetra Pak: Materia prima para la industria. 6 de Agosto de 2013, sitio web: <http://www.cnnexpansion.com.mx>.
- [3] Gómez R. (2013). Desarrollo de un proceso de separación Aluminio-Polímero a partir de TETRAPACK. Tesis.
- [4] Nápoles T. (2007). Depósito reembolso, herramienta para impulsar el cuidado ambiental y el desarrollo económico de México. Tesis.
- [5] Boseck, Salviani S. (2009). Economías informales de la ciudad de México. Gestion, 12, 30.
- [6] Enríquez R. (2006). La responsabilidad ampliada, una propuesta normativa al problema de contaminación ambiental por envases multicapa. Ponencia impartida en el XI congreso Nacional del V internacional de ciencias ambientales. Morelos.
- [7] Investigaciones Cld. (2008) El envase de cartón laminado tipo Tetra Brik®: un problema ambiental y sus posibilidades de aprovechamiento.
- [8] Gonzáles M. (2001). Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. Una aproximación monetaria. Gaceta ecológica, 17-26.
- [9] Enríquez R., Lina P. (2008). La responsabilidad ampliada para el manejo y tratamiento de envases multicapa en la ciudad de México. CIEMAD-IPN,1, 1-3.
- [10] Domínguez L. Guemez P. (2010). Fabricación y evaluación de paneles aplicables a la industria de la construcción a partir del reciclaje de empaques multicapa (Tetra Brik). Ingeniería Revista Académica, 14.

[11] Illanes J. (2014). Envases flexible plásticos: usos y aplicaciones en la industria alimentaria. Universidad Austral de Chile.

[12] Wamsler A. (2000). El sector informal en la separación del material reciclable de los residuos sólidos en el Estado de México.

[13] Thesis Consultores S.C. (2002). Precios de los materiales recuperados a través de la pepena. Dirección general de la Investigación en política y Economía Ambiental.

[14] Tetra Pak. Nuestra historia. (2014). 25 de Marzo de 2014, sitio web; <http://www.tetrapak.com/mx/about-tetra-pak/history/nuestrahistoria>.

[15] Reyes P. (2007). Reciclaje de envases de Tetra Pak: su factibilidad técnica y económica. Universidad mayor de san Marcos.

[16] Hoover, L. (2002). Tendencias en empaques para alimentos. Revista Conversión, 11, 39-45.

[17] ENVAPACK. (2000). Envases y embalajes para alimentos, Boletín electrónico 5.

[18] Serrat, C. (2003). Adhesivos para estructuras multicapa-barrera en polietilenos utilizados en el embalaje de alimentos y especialidades, DOW QUIMICA, 5,8-10.

[19] Tetra Pak. (2003). ¿Qué sucede con los cartones para bebidas usados?, 9 de Septiembre de 2013, sitio web: www.Cartonbebida.com.

[20] Reséndiz J. (2007). Efecto del tamaño de partícula en la fabricación de pellet y película de baja densidad (PEBD) reciclado, así como sus propiedades reológicas y mecánicas, Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, Instituto Politécnico Nacional.

[21] Robertson. (1993). Food of packaging: principles and practice. Editorial MercelDecker.

[22] Careaga JA. (1993). Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes, Instituto Nacional de Ecología.

[23] Aguilar A. (2013). Busca Tetra Pak que México se convierta en su 5° sitio productivo más exportaciones quid y aquí otros segmentos del camino, El Universal, 18 de Septiembre de 2013, sitio web: <http://www.eluniversalmas.com.mx/columnas/2013/02/100102.php>.

[24] Zuñiga ME. (2011). Tetra Pak el anaquel de los mercados, 18 de Octubre de 2013, sitio web: <http://www.cnnexpansion.com/expansion/2013/02/08/el-nuevo-lechero>.

[25] Turrado J., Dávalos MF. (2000). Envases de cartón para líquidos como fuente de fibra secundaria, Información tecnológica, 23:59-66.

[26] Billmeyer FW (1984). Textbook of polymerscience: Wiley.

[27] Tetra Pak. (2011). Packages, 7 de Agosto de 2013, sitio web: <http://www.tetrapak.com/Pages/default.aspx>.

[28] Tetra Pak. (2012). Tetra Pak y los programas de reciclaje, 18 de Marzo de 2014, sitio web: <http://www.tetrapak.com/mx/environment/reciclaje-edu/programas-reciclaje>.

[29] Tetra Pak España. (2003). ¿Qué sucede con los cartones para bebidas usados?, España.

[30] Enso S. (2011). Xataka, ciencia viaja a una planta recicladora en Barcelona, 24 de Enero de 2014, sitio web: <http://www.xatakaciencia.com/medio-ambiente/xataka-ciencia-viaja-a-una-planta-de-reciclaje-en-barcelona-y-ii>.

- [31] Roca IE. (2005). Estudio de las propiedades y aplicaciones del polietileno de alta densidad (PEAD). Guatemala; Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [32] Callister W. (1995). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté.
- [33] Morrison RT, Boyd RN. (1998). Química Orgánica. Editorial Pearson Educación.
- [34] Beltrán R. (2011). Estructura y propiedades de los polímeros. Tecnologías de los polímeros.
- [35] McMurry J. (2008). Química Orgánica. Editorial Cengage Learning.
- [36] Wells GM. (1991). Handbook of petrochemicals and processes, Londres.Inglaterra.
- [37] Textos científicos. (2005). Polietileno, 13 de Agosto de 2013, sitio web: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>.
- [38] Yearbook international. (1988). Stanford research institute, process economic program. California, EEUU.
- [39] Evers B., Hawkins S. (1990). Ullman's encyclopedia of industrial chemistry.Editorial VCH.
- [40] Seymour RB., CharlesJrE. (1995). Introducción a la química de los polímeros. Editorial Reverté.
- [41] Domenico L. (2008). Tapones sintéticos en enología. Los materiales, métodos de producción, características técnicas. Editorial Mundi-Prensa libros.
- [42] Tecnología de los plásticos. (2011). 24 de Noviembre de 2013, sitio web: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx>.

- [43] Billmeyer FW. (1975). Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté.
- [44] Frías AC., Lema II. (2003). La situación de los envases de plástico en México. Gaceta ecológica.
- [45] Conde MP. (2011). Presente futuro de la industria del plástico en México. Ambiente plástico.
- [46] Arandes JM, Elorriaga JB. (2004). Reciclado de residuos plásticos. Revista Iberoamericana de polímeros, 1:5-3.
- [47] Maldonado L. (2010). La reducción y reciclaje de residuos sólidos urbanos en centros de educación superior. Revista Ingeniería, 10, 59-68.
- [48] Méndez C. Polietileno lineal de baja densidad; 2013, 14:28-15.
- [49] Guerra N. (2006). Estudio de las propiedades mecánicas y reológicas del polietileno de alta densidad y antioxidante en base de fosfitos durante cinco ciclos de inyección. Centro de investigación científica y tecnológica de Ecuador.
- [50] Aracil I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). Universidad de Alicante, España. Tesis.
- [51] Mora JM. (2007). Efecto de la temperatura en la variación de la viscosidad de un aceite degradado por fritura en inmersión de papas. Universidad de Pamplona. Tesis.
- [52] Torkelson TR., Rowe VK. (1976). The toxicity of chloroform as determined by single and repeated exposure of laboratory animals. The American Industrial Hygiene Association Journal, 12,37-12.
- [53] Estructura física y química del polietileno (2005). 15 de Diciembre de 2013, sitio web: <http://www.textoscientificos.com/polimero/polietileno/estructura>.

[54] Herrador M. (2001). Laboratorios síntesis orgánica Campus Universitario de Fuente Nueva en Química.

[55] Onzan A. (1987). Pyrolysis of solidwastematerials. Evisa, 3, 15-409.

[56] Martínez C. (1980). Eliminación de RSU por medio de pirólisis, 6, 26-49.

[57] Ferrer C. (2012). Bio-compuestos termoplásticos basados en aceites vegetales. Estudio de su aplicabilidad al envasado de alimentos. Universidad de Alicante, España. Tesis.

[58] Corte P. (1987). High-temperature gasification of carbonaceous materials by flash pyrolysis. Fuel, 66, 1107-14.

[59] Marcilla F. (1988). Gaseous hydrocarbons from flash pyrolysis of almond shells. Ind. Chemical, 27, 1143-9.

[60] Mallya H. (1988). Pyrolysis experiments with MSW components. The 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering. Denver Colorado.