



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUATITLAN.

EVALUACION DE LOS PRINCIPALES PROCESOS  
QUIMICOS DE RECICLADO DE  
POLIETILENTEREFTALATO (PET) Y SU EFECTO  
EN LA CONTAMINACION AMBIENTAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA:

JOSE JUAN JIMENEZ AGUILAR

ASESOR: I.M. ARTURO ORTEGA DIAZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO, 2010



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Evaluación de los principales procesos químicos de reciclado  
de polietilentereftalato (PET) y su efecto en la contaminación  
ambiental.

que presenta el pasante: José Juan Jiménez Aguilar  
con número de cuenta: 302279694 para obtener el título de:  
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de Marzo de 2010.

PRESIDENTE	<u>Q. Celestino Silva Escalona</u>	
VOCAL	<u>I.Q. Margarita Castillo Agreda</u>	
SECRETARIO	<u>M.I. Arturo Ortega Díaz</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.Q. María Elena Quiroz Macías</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I.Q. Paula Alvarez Fernández</u>	

## DEDICATORIAS

A Dios:

Por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida, y por dejarme vivir este gran sueño que no acaba aquí sino seguira el resto de mi vida, hasta donde me permitas llegar.

A tí papá:

Que eres un orgullo y un gran ejemplo para mí, me enseñaste que el éxito en la vida es hacer las cosas bien y a la primera. Por el enorme esfuerzo y sacrificio que fue el sacarme adelante y que a pesar que algunos instantes estuviste lejos, siempre te senti cerca de mi. Gracias... Te quiero

A ti mamá:

Gracias por estar conmigo en todo momento, por tus regaños, tus desvelos, tus consejos, tu comprensión, tus besos, tus abrazos... Por ser mi mejor amiga y por convertirme en el hombre que soy ahora. Solo me queda decirte, que si dios me diera la oportunidad de escoger una mamá esa serias tu... Te quiero

A mi hermana:

Te agradezco todo lo que has hecho por mí, no sólo eres una excelente hermana sino una gran mujer y una gran amiga que me enseñó a ser fuerte, y que si quieres algo en la vida lo puedes conseguir por muy difícil que parezca... Te quiero

A mi hermano:

A ti solo puedo decirte, que no solo eres mi hermano sino mi mejor amigo. Gracias por todo el apoyo que me has brindado en el transcurso de toda mi vida. Y este logro sientelo como tuyo, porque lo es... Te quiero

Nay :

A ti amor por estar conmigo y convertir la oscuridad en una luz infinita, que alumbra mi camino y llena de felicidad mi vida. Gracias por estar conmigo en los momentos malos y en los buenos; por traer a mi vida alegría, felicidad, amor y mil cosas más.

A mis primos:

Por estar conmigo en todo momento, gracias.

A mis tios:

Gracias por creer en mi y estar conmigo en todo momento.

A mi abuelo Fidencio:

Por el ejemplo que representa para mi.

A mis amigos:

A todos mis amigos, por estar conmigo en los buenos y malos momentos que he pasado y que gracias a sus consejos los he superado. También por ser mis hermanos que pude escoger en este mundo y gracias por todos esos maravillosos embotellamientos que hemos pasado y espero sean muchos más.

A mi asesor:

Gracias por su amistad antes de nada, por su tiempo y por haber aceptado dirigir esta tesis. Gracias ingeniero por confiar y creer en mí.

A mis profesores:

Por la transmisión de sus conocimientos y su experiencia profesional, que me permitieron llegar hasta este momento. En verdad muchas gracias.

# ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	i
Índice de tablas	ii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	2
1.0 GENERALIDADES DE LOS PLASTICOS	3
1.1 Marco histórico de los plásticos	4
1.2 Definición de Plástico	11
1.3 Procesos de obtención y producción de plásticos	12
1.3.1 Polimerización por adición	12
1.3.2 Polimerización por condensación	13
1.3.3 Producción de plásticos	14
1.4 Materias primas	15
1.5 Propiedades físicas y químicas de los plásticos	16
1.6 Aplicaciones	18
1.7 Clasificación	19
2.0 GENERALIDADES DEL POLIETILENTEREFTALATO	23
2.1 Definición de PET	23
2.2 Marco Histórico	23
2.3 Obtención de resinas PET	24
2.3.1 Reacción para la obtención de resina PET	25
2.3.2 Materias Primas	27
2.4 Producción del PET	27
2.5 Clasificación del PET	28
2.5.1 PET grado fibra	29
2.5.2 PET grado película y lámina	29
2.5.3 PET grado botella	30
2.5.4 PET grado ingeniería	30

2.6 Propiedades generales del PET	30
2.7 Aplicaciones del PET	31
2.8 Definición de envase	33
2.8.1 Introducción de envases PET en el mercado	33
2.8.2 Producción de envases PET	35
2.8.3 Propiedades de envases PET	36
2.8.4 Como se identifica	37
2.8.5 Mercado nacional del PET	37
3.0 RESIDUOS DE ENVASES PET	39
3.1 Generadores de desechos PET	39
3.2 Fuentes de desperdicios PET	41
3.3 Métodos de clasificación de envases PET	44
3.4 Tratamiento de desechos de PET	46
3.5 Secuencias para la disminución de desechos plásticos	47
3.6 Datos estadísticos sobre el PET en México.	48
3.7 Efecto del reciclaje de PET en el medio ambiente	50
3.8 Ley de residuos sólidos	53
4.0 PROCESOS DE RECICLADO DE PET	55
4.1 Definición	55
4.2 Historia del reciclado de PET	55
4.3 Tipos de Reciclado	58
4.3.1 Reciclado Primario	58
4.3.2 Reciclado Secundario	58
4.3.3 Reciclado Terciario	58
4.3.4 Reciclado Cuaternario	59
4.4 Reciclado Mecánico	59
4.4.1 Reciclaje físico (mecánico)	60
4.4.2 Propiedades del PET reciclado físicamente	61
4.4.3 Desventajas del reciclado físico	63

4.5 Reciclado químico	63
4.5.1 Proceso de Metanólisis	64
4.5.1.2 Reacción de metanálisis	65
4.5.1.3. Características principales de la Metanólisis como un proceso para el reciclaje químico del PET.	67
4.5.2 Proceso de Glicólisis	67
4.5.2.1 Reacción de Glicólisis	67
4.6 Reciclado energético	68
4.7 Usos y aplicaciones del PET reciclado	69
4.7.1 Características	70
4.7.2 Usos	70
CONCLUSIONES	73
APENDÍCE	75
Codificación internacional para los distintos plásticos	75
REFERENCIAS	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacción de obtención de PET.	26
Figura 2. Reacción sintetizada.	26
Figura 3. Proceso de obtención del PET.	28
Figura 4. Identificación del PET.	37
Figura 5. Composición de la basura en México en el 2008.	41
Figura 6. Fuentes de desperdicios PET en México.	43
Figura 7. Producción de desechos plásticos.	44
Figura 8. Ciclo de vida del envase PET.	57
Figura 9. Proceso de reciclaje mecánico de PET.	60
Figura 10. Proceso de reciclaje químico de metanólisis de PET.	65
Figura 11. Reacción de Metanolisis en el reciclaje del PET.	66
Figura 12. Reacción de Glicólisis en el reciclaje del PET.	68
Figura 13. Proceso de reciclado energético de PET.	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Historia de los Polímeros.	11
Tabla 2. Principales Plásticos Termoplásticos.	20
Tabla 3. Principales Plásticos Termoestables.	21
Tabla 4. Principales Plásticos Elastómeros.	22
Tabla 5. Aplicaciones del PET grado botella.	32
Tabla 6. Comparación entre los sistemas de fabricación.	36
Tabla 7. Usos de desechos industriales.	40
Tabla 8. Millones de toneladas de desechos plásticos.	44
Tabla 9. Densidades de los materiales plásticos en la elaboración de envases.	45
Tabla 10. Comparación de las propiedades de PET virgen reciclado.	62
Tabla 11. Hojuelas de PET reciclado.	62
Tabla 12. Características del PET usado para empaçado.	71
Tabla 13. Comparación de reciclaje mecánico y químico.	72

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo pretende dar una visión del desarrollo tecnológico en el reciclado de envases de Polietilentereftalato y algunos de los procesos en los últimos años.

También se presentarán los datos necesarios que permitan analizar la importancia que tiene el reciclado de PET, así como procesos de recolección, tratamiento y reciclado que se emplean en la actualidad.

Existen varios tipos de procesos químicos para reciclar el PET algunos de ellos son:

- Pirólisis
- Hidrogenación
- Gasificación
- Quimiólisis
- Metanólisis

Siendo el más utilizado el último debido a que el producto que se obtiene, mediante este proceso es de mucho más pureza que el de cualquier otro proceso químico.

Además gracias al proceso de metanólisis la contaminación que produce el PET se ve considerablemente disminuido, ya que el producto se puede volver a utilizar a grado alimenticio, es decir, la gran cantidad de envases PET empleados en la industria de embotellado de gaseosas, generan una gran cantidad de contaminación ambiental. Por lo que este proceso podría significar la solución del problema de contaminación de PET en el ambiente.

Este proceso requiere de una gran inversión financiera, lo que da como resultado que en México, sólo algunas empresas transnacionales como Coca-Cola son las que cuentan con esta tecnología.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General.**

- ❖ Describir los principales procesos químicos de reciclado de polietilentereftalato, en base a su uso, a sus propiedades físico-mecánicas, que permitan disminuir la contaminación ambiental.

### **Objetivos Particulares.**

- ❖ Citar los principales procesos químicos de reciclado de PET.
- ❖ Conocer en base a sus características físicas el uso potencial del PET reciclado.
- ❖ Desarrollar una fuente de información, que sirva de guía a estudiantes de licenciatura y a los interesados en el reciclado de PET.

# CAPITULO I

## GENERALIDADES DE LOS PLÁSTICOS

El desarrollo de los plásticos dió como resultado materiales de construcción nuevos y económicos, que cubrió las necesidades en la industria química, alimentaría, etc.

Un plástico se puede definir como un material que contiene una sustancia orgánica de gran peso molecular como ingrediente esencial y en su estado final es un sólido.

Los plásticos se caracterizan por una alta relación resistencia-densidad, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes.

Las macromoléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoestables (no se ablandan con el calor).

Los plásticos proceden de recursos naturales: petróleo, gas natural, carbón y sal común. Del total del petróleo usado, un 7% se destina a la industria petroquímica; de esta cantidad el 4% se utiliza para la producción de plásticos y el 3% para otros usos.

El 86% del petróleo se quema para producir energía utilizando un recurso natural no renovable. En cambio el porcentaje destinado a la fabricación de materiales plásticos puede tener la posibilidad de su recuperación [2].

Durante los últimos cincuenta años se ha dado un gran auge a la industria petroquímica, que ha hecho posible el desarrollo de nuevos materiales de origen polimérico, con grandes aplicaciones en el sector que nos ocupa.

Estos plásticos en los campos del empaque, envase, y embalaje, han conseguido sustituir en gran parte, con excelentes resultados a otros materiales, gracias a su facilidad de producción, su bajo costo, su gran resistencia, y a su excelente desempeño.

## 1.1 Marco histórico de los plásticos

La investigación de los plásticos se inició desde 1830, descubriéndose más de 100 plásticos hasta 1990, con más de cien mil aplicaciones [1].

### ❖ Polietileno (PE)

Las olefinas como el etileno, en estado gaseoso, tienen poca tendencia a polimerizar, pero las investigaciones de los ingleses Perrin y Swallow realizadas en 1931 en los laboratorios de la Imperial Chemical Industries, les permitieron observar que el etileno sometido a temperaturas de unos 170 ° centígrados y 1.400 atmósferas de presión, se transformaba en polímeros de etileno con el aspecto de polvillo blanco.

Este plástico tenía una gran flexibilidad, y una extraordinaria resistencia química y dieléctrica, lo que le hacía muy adecuado para el aislamiento de cables.

El alemán Ziegler, del Instituto de Investigación del Carbón, de Mülheim/Ruhr, basándose en los trabajos iniciados por el italiano Natta, consiguió la polimerización de etileno a presión atmosférica y a temperaturas inferiores a 70 °C. Pero las propiedades de este plástico eran muy diferentes a las del obtenido por Perrin y Swallow.

Esto era debido a que el primero tenía una estructura muy ramificada (amorfa) y el segundo tenía estructura lineal (de tipo cristalino). La primera consecuencia era que la densidad del primero comprendida entre 0,91-0,93 era más baja que la del último que estaba entre 0,94 y 0,96.

Internacionalmente se denominan Polietileno de Baja Densidad, de los ramificados, y Polietileno de Alta Densidad a los de cadena lineal o estructura cristalinas.

Todos estos materiales tienen una gran resistencia a los productos químicos, ácidos, bases, aceites, grasas, disolventes, etc. Sin embargo, su resistencia es moderada para los hidrocarburos normales.

El PEBD, polietileno de baja densidad, o LDPE (low density polyethylene), como se conoce internacionalmente, se utiliza para fabricar bolsas flexibles, embalajes industriales, etc. También gracias a su resistencia dieléctrica se utilizan para aislante de cables eléctricos.

El PEAD, polietileno de alta densidad, o HDPE (High density polyethylene), se utiliza también para bolsas (grandes almacenes, mercados) también gracias a su resistencia al impacto se utiliza para cajas de botellas, de frutas, pescado, tuberías, juguetes, cascos de seguridad industrial.

Gracias a su estructura lineal sirve para cuerdas y redes (estacas de barcos y redes de pesca), lonas para hamacas. La resistencia térmica permite usarlo para envases que deban ser esterilizados en autoclave (leche, sueros, etc.).

Debido a su gran facilidad de extrusión para filmes, los polietilenos son muy utilizados para recubrimientos de otros materiales, papel, cartón, aluminio y para embalajes (fundas de plástico).

#### ❖ Poliamida (PA)

En 1930 Carothers y J.Hill trabajando en los laboratorios de la empresa química Du Pont de Nemours descubrieron un polímero con el que se podían hacer hebras de gran resistencia, era la primera poliamida 6,6, que se comercializó diez años más tarde con el nombre de nylon.

En 1938 Schlack en los laboratorios de la empresa alemana Farbenindustrie conseguía la polimerización de la PA 6, que se comercializó con el nombre de marca Perlon.

Las poliamidas se consiguen por la poliadición de un producto (PA 6), o la policondensación de dos productos distintos (PA6,6). El número se refiere al número de átomos de carbono de que se compone la molécula básica de la cadena. La PA 6 es la policaprolactama, la caprolactama tiene 6 carbonos. Y la PA 6,6 es la obtenida por la policondensación de la hexametildiamina (6 átomos de carbono) y el ácido adípico (6 átomos de carbono).

Las poliamidas presentan unas propiedades físicas próximas a las de los metales como la resistencia a la tracción entre 400 - 600 Kg / cm<sup>2</sup>. Tienen un coeficiente de rozamiento muy bajo no necesitando lubricantes las piezas sometidas a fricción. Bajo peso específico entre 1.04 y 1.15, buena resistencia química, fácil moldeo, y resistencia a temperaturas de trabajo de hasta 1200 °C. Todas estas propiedades las hace apropiadas para engranajes, cojinetes, cremalleras, aspas de ventiladores industriales, tornillos, etc.

Tienen un inconveniente, su higroscopicidad. Absorben agua en un porcentaje variable, esto hace que disminuyan sus propiedades mecánicas, y aumentan el volumen al hincharse.

El refuerzo con fibra de vidrio mejora sus propiedades mecánicas y disminuye el riesgo de variaciones de volumen.

Por ejemplo muchas cerraduras y manillas de puertas tienen este recubrimiento, también piezas de barcos.

#### ❖ Policloruro de Vinilo (PVC)

Comenzó a fabricarse industrialmente en 1931, en la empresa alemana IG Farbenindustrie, gracias a los trabajos de Hubert y Schönburg.

A este plástico es necesario añadirle aditivos, plastificantes, cargas, otros polímeros, para que adquiera las propiedades que permitan su utilización en las diversas aplicaciones.

Su capacidad para admitir todo tipo de aditivos permite que pueda adquirir propiedades muy distintas y teniendo en cuenta su precio relativamente bajo le hace ser un material muy apreciado y utilizado para fabricar multitud de productos.

Así puede ser flexible o rígido; transparente, translúcido o completamente opaco; frágil o tenaz; compacto o espumado.

El PVC rígido no lleva aditivos plastificantes. El flexible o plastificado, sí los lleva.

Es un polímero amorfo. Se utiliza para fabricar tuberías, suelas de zapatos, juguetes, mangueras, pavimentos, aislante de cables eléctricos, perfiles de ventanas, etc.

❖ Polietilentereftalato (PET)

El descubrimiento de polietilentereftalato, mejor conocido como PET, fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickson. Investigaron los poliésteres termoplásticos en los laboratorios de la Asociación Calico Printers. Durante el periodo de 1939 a 1941.

Hasta 1939, este terreno era el gran desconocido pero a partir de ese año existía la suficiente evidencia acumulada favoreciendo la teoría que la microcristalinidad era esencial para la formación de fibras sintéticas fuertes.

A partir de 1976, se le usa para la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes principalmente para bebidas. Sin embargo, el PET ha tenido un desarrollo extraordinario para empaques. En México, se comenzó a utilizar para este fin a mediados de la década de los ochenta.

Los primeros envases de PET aparecen en el mercado alrededor del año 1977 y desde su inicio hasta nuestros días el envase ha supuesto una revolución en el mercado y se ha convertido en el envase ideal para la distribución moderna.

Por esta razón el polietilentereftalato se ha convertido hoy en el envase más utilizado en el mercado de la bebidas refrescantes, aguas minerales, aceite comestible y detergentes; también bandejas termoformadas, envases de salsas, farmacia, cosmética, licores, etc.

La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955; desde entonces, el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico hasta lograr un alto nivel de sofisticación basado en el espectacular crecimiento del producto a nivel mundial y la diversificación de sus posibilidades.

#### ❖ Polimetacrilato (PMMA)

Caspary y Tollens lo obtuvieron en 1873, pero no se utilizó a gran escala hasta que el alemán Röm lo fabricó y comercializó bajo la marca Plexiglas.

Este plástico tiene una gran transparencia, además de elevada rigidez y tenacidad, buena resistencia química, fácil moldeo, y buen comportamiento dieléctrico.

Se utiliza en múltiples aplicaciones, accesorios para cuartos de baño, parabrisas y ventanas de aviones, portillos de barcos, etc.

También se puede moldear por colada. Se pueden obtener planchas por colada entre dos planchas de vidrio.

Y después pueden ser fácilmente mecanizadas.

Al ser un material muy transparente, se utiliza también en óptica, lentes de máquinas fotográficas, gafas.

Para aumentar la dureza y evitar el rayado de las lentes se les da un tratamiento de fluoración.

#### ❖ Polipropileno (PP)

Los trabajos de Natta y Ziegler que les permitieron conseguir polímeros de etileno a partir de las olefinas, abrieron el camino para la obtención de otros polímeros.

La fabricación del polipropileno se inicia en 1957. Este plástico, también con una estructura semicristalina, superaba en propiedades mecánicas al polietileno, su densidad era la más baja de todos los plásticos, y su precio también era muy bajo, pero tenía una gran sensibilidad al frío, y a la luz ultravioleta, lo que le hacía envejecer rápidamente. Por este motivo su uso se vio reducido a unas pocas aplicaciones.

Pero el descubrimiento de nuevos estabilizantes a la luz, y la mayor resistencia al frío conseguida con la polimerización propileno-etileno, y la facilidad del PP a admitir cargas

reforzantes, fibra de vidrio, talco, amianto, etc. y el bajo precio de dieron gran auge a la utilización de este material.

Se utiliza para muchas piezas de automóviles, como por ejemplo los parachoques, en carcasas de electrodomésticos y cajas de baterías, y otras máquinas.

Al tener una estructura lineal se utiliza para rafias y monofilamentos, fabricación de moquetas, cuerdas, sacos tejidos, cintas para embalaje.

Soporta bien temperaturas cercanas a los 100 °C por lo que se utiliza para tuberías de fluidos calientes.

Lo podemos encontrar también en envases de medicamentos, de productos químicos, y sobre todo de alimentos que deban esterilizarse o envasarse en caliente.

También se utiliza en forma de film ya que tiene una gran transparencia y buenas propiedades mecánicas: mirillas para sobres, cintas autoadhesivas, etc.

#### ❖ Polioximetileno (POM)

También se conoce este plástico como resina acetálica, poliacetal o poliformaldehído. Fue obtenido por primera vez por el químico Staudinger, pero debido a su inestabilidad térmica se desechó su fabricación industria.

El hecho de que sus propiedades mecánicas eran incluso superiores a las de las poliamidas, hizo que se trabajara intensamente para solventar este problema de baja resistencia térmica.

Así en 1958 aparecieron el homopolímero acetático, y el copolímero acetático.

En el primero se consiguió su estabilidad térmica mediante aditivos. En el copolímero se consiguió injertando en la cadena unos núcleos.

Homopolímeros y copolímeros tienen algunas diferencias en sus propiedades pero en general podemos decir de ambos que tienen un buen coeficiente de deslizamiento, buena

resistencia química a los disolventes y grasas, aunque deficiente en medios ácidos o muy alcalinos, excelentes propiedades mecánicas, y no absorben agua.

Se utiliza para engranajes, cojinetes, piezas de pequeñas máquinas, fijaciones de esquís, etc.

#### ❖ Policarbonato (PC)

Este plástico apareció en los años cincuenta.

Es amorfo y transparente, aguanta una temperatura de trabajo hasta 135 °C, y tiene buenas propiedades mecánicas, tenacidad y resistencia química.

Se utiliza en electrotecnia, aparatos electrodomésticos, piezas de automóviles, luminotecnia, cascos de seguridad.

Se hidroliza con el agua a elevadas temperatura [2, 10,11].

En la tabla 1 se hace un resumen de la historia de los polímeros más importantes y el año de introducción en el mercado.

**Tabla 1. Historia de los Polímeros [7]**

<b>POLÍMEROS</b>	<b>AÑO DE INTRODUCCIÓN</b>
Poliuretano	1848
Nitrato de celulosa	1868
Acetato de celulosa	1894
Fenol-Formaldehido	1909
Éteres de celulosa	1912
Vinilos	1927
Acrilatos	1931
Furanos	1934
Poliestireno	1937
Poliamidas	1938
Melamina-Formaldehido	1939
Polietilentereftalato	1939

## **1.2 Definición de plásticos**

Plásticos es el nombre que reciben en general los polímeros sintéticos. Es una sustancia que esta constituida a partir de la unión de un gran número de pequeñas moléculas denominadas, monómeros, que se repiten aproximadamente un centenar de veces, pudiendo llegar a miles, incluso millones de veces.

La unión de los monómeros puede efectuarse en una sola dirección, lo que origina los polímeros lineales o en cadena; y en más de una dirección, para dar lugar a los polímeros ramificados, o bien reticulados, de cadenas tridimensionales.

Al número de unidades que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización. Otra característica importante de estos materiales es que prácticamente todos ellos son obtenidos de manera sintética [4].

### **1.3 Procesos de obtención y producción de plásticos.**

Industrialmente las reacciones de polimerización se llevan a cabo en reactores donde se introducen como materia prima los monómeros correspondientes y el catalizador.

Según el proceso, se fijan la presión y la temperatura, agitando la mezcla para favorecer la reacción, obteniéndose el polímero. Estos procesos poliméricos se obtienen en forma de gránulos, polvos o líquidos. El proceso de polimerización desde el punto de vista técnico e industrial, se rige en función del tipo de monómero, catalizadores utilizados y de las propiedades que se desean en el producto final.

Se le llama polimerización al proceso de obtención de plásticos (polímeros) y existen dos métodos generales para formar las moléculas grandes a partir de monómeros pequeños; los procesos son: polimerización por adición y polimerización por condensación.

#### **1.3.1 Polimerización por adición**

Los monómeros se unen entre ellos sin que las moléculas pierdan átomos, la característica principal es que estas reacciones de adición producen longitudes específicas. Otra característica es que los monómeros deben poseer un enlace múltiple (doble o triple) en su estructura. También a esta reacción se le denomina reacción en cadena. Algunos de los principales polímeros de esta polimerización son polietileno, polipropileno, acrílico, policloruro de vinilo (PVC) y el poliestireno.

Para obtener un polímero de adición, se pueden emplear varios procedimientos, y la selección del método depende de varios factores entre los que se destacan el volumen de producción y el uso que se le va dar al producto; los métodos son:

*Polimerización en masa:* Esta polimerización es extremadamente exotérmica, teniendo dificultades para el control de la temperatura y de la agitación que reacciona volviéndose

rápidamente viscoso desde el inicio de la polimerización. Su capacidad es limitada porque se requiere un agente presente en la mezcla reaccionante que sea capaz de absorber el calor de la reacción.

*Polimerización en solución:* En este proceso se disuelve el monómero en un solvente no reactivo que contiene un catalizador. El calor liberado por la reacción es absorbido por el disolvente y de esta forma disminuye la velocidad de la reacción. Este proceso de polimerización se emplea sobre todo cuando el polímero final va a aplicarse en forma disuelta, como en el caso de adhesivos y barnices.

*Polimerización en suspensión:* En este proceso el monómero se suspende en agua mediante agitación y se agregan estabilizadores (coloides) como talco, tierra de batán y bentonita para estabilizar la suspensión y evitar que los glóbulos de monómero se adhieran entre sí. Normalmente el iniciador es soluble en el monómero, se polimeriza como una perla de alto peso molecular. El calor de polimerización se elimina con el agua y ello permite un control de temperatura exacto. El estabilizador debe retirarse del polímero y entonces debido a una solubilidad parcial del monómero y el agua, se lleva a cabo una polimerización subsidiaria en fase acuosa, lo que produce un polímero de baja densidad.

*Polimerización por emulsión:* Este proceso es similar al proceso de suspensión, puesto que se lleva a cabo en agua. Sin embargo se agrega un emulsificante para dispersar al monómero en partículas muy pequeñas. Este proceso al igual que el de suspensión es muy utilizado.

### **1.3.2 Polimerización por condensación**

En la polimerización por condensación los monómeros afines se unen con la eliminación simultánea de átomos o grupos de átomos reaccionando entre sí. Estas reacciones de condensación producen diferentes longitudes de polímeros y las características que poseen dichas moléculas. Algunos de los principales polímeros que se obtienen mediante esta polimerización son el nylon, los poliuretanos y los poliésteres [4].

### 1.3.3 Producción de plásticos

La fabricación de los plásticos y su manufactura implica cuatro pasos básicos:

Obtención de materias primas, síntesis de polímero básico, formulación del polímero o moldeo y deformación del plástico hasta su forma definitiva.

1. **Materias primas:** En principio la mayoría de los plásticos se fabrican a partir de resinas de origen vegetal como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena), aceites de semillas y derivados del almidón o del carbón. A pesar de que la producción de nylon se basaba originalmente en el carbón, el aire y el agua y que el nylon 11 se fabrica todavía con semillas de ricino; la mayoría de los plásticos se fabrican actualmente con derivados del petróleo. Las materias primas derivadas del petróleo no son tan baratas como abundantes, no obstante dado que la existencia mundial del petróleo tiene un límite, se están investigando otras fuentes de obtención de materias primas como la gasificación del carbón.
2. **Síntesis del polímero:** Para la fabricación de un plástico se lleva a cabo la polimerización, empleando los dos métodos básicos ya descritos anteriormente.
3. **Formulación del polímero:** En la formulación del polímero, con frecuencia se utilizan aditivos químicos, para conseguir una propiedad determinada; por ejemplo, los antioxidantes protegen al polímero de las degradaciones químicas causadas por el oxígeno o el ozono. De una forma parecida los estabilizadores lo protegen de la intemperie. Los plastificantes producen un polímero más flexible, los lubricantes reducen la fricción y los pigmentos colorean a los plásticos.

Muchos plásticos se fabrican en forma de material compuesto, lo que implica la adición de un material de refuerzo (fibra de vidrio o de carbón) a la matriz de resina plástica. Los materiales compuestos tienen la resistencia y la estabilidad y por lo general son más ligeros. Las espumas plásticas compuestas de plástico y gas proporcionan una masa de gran tamaño pero muy ligero.

4. **Moldeo o deformación:** Las técnicas empleadas para conseguir la forma final y el acabado de los plásticos dependen de tres factores: tiempo, temperatura y deformación. La naturaleza de muchos de estos procesos es de naturaleza cíclica, si bien algunos pueden clasificarse como continuos o semicontinuos.

Una de las operaciones más utilizadas es la extrusión. Una máquina de extrusión consiste en una bomba que desplaza al plástico a un molde con la forma deseada.

Los productos extrusionados como por ejemplo los tubos tienen una sección de forma regular. Las máquinas de extracción también realizan otras operaciones como moldeo por soplado o moldeo por inyección [12,13].

#### **1.4 Materias primas**

La principal materia prima para fabricar plásticos es el petróleo, de la producción de éste se destina el 7% para la fabricación de plásticos.

Otras materias primas que se emplean para su fabricación son los monómeros, pero en menor proporción son el carbón, el gas natural, la madera, el algodón y el maíz, éste último se emplea para generar un polímero llamado polilactina.

Todas las materias primas mencionadas, junto con el petróleo, tienen en común en su estructura: carbón, nitrógeno, oxígeno, azufre y cloro [3,10 y 11].

Las formas en la que se presentan las materias primas de acuerdo a su procesamiento son:

-Polvos

-Pastas

-Granulado

-Cubos granulados

-Cilindros

-Aglomerados

-Lentejas

-Solución

## **1.5 Propiedades físicas y químicas de los plásticos**

Los plásticos tienen una serie importante de propiedades, que unidas a su costo relativamente bajo, explican su amplia utilización en ingeniería. Se enlistan algunas de estas.

**Propiedades Físicas:** Estas se refieren a los principales componentes, las fuerzas que estos ejercen entre sí y los efectos de dichas fuerzas. La densidad, la absorción, la permeabilidad y la transparencia.

**Propiedades Mecánicas:** Los termoplásticos, si se someten a esfuerzos suficientemente grandes, se deforman de manera similar a los metales dúctiles, cuando se ejerce sobre ellos esfuerzos superiores al límite de fluencia. Los termoestables, por ser frágiles, se deforman muy poco bajo la aplicación de cargas.

Las resistencias a la tensión y a la compresión de los plásticos, son inferiores a las correspondientes al magnesio. La ventaja relativa, respecto a los metales, es considerablemente cuando se necesita la resistencia y el peso. Esto se debe principalmente a la baja densidad de los plásticos.

El modulo de elasticidad de los plásticos rígidos es más bajo que el del concreto.

Las cargas aplicadas durante largos periodos de tiempo, producen una deformación gradual de los plásticos, provocando fallas con cargas menores que las indicadas por las pruebas de corta duración.

Otro fenómeno observado en estos materiales, es su baja estabilidad dimensional, es decir, se deforman con el tiempo aun cuando no tengan cargas aplicadas.

Otra propiedad de los plásticos es su capacidad de amortiguar el ruido y las vibraciones.

La curva esfuerzo-deformación unitaria de los plásticos no presenta la porción inicial recta, típica de los materiales.

**Propiedades Eléctricas:** Aún cuando los polímeros son intrínsecamente malos conductores de la electricidad (aislantes), esta propiedad puede ser alterada agregando ciertos aditivos. Esto se logra en determinados plásticos agregando grafito finamente pulverizado, mientras que en otros la conductividad se consigue tratando el polímero con radiaciones gamma.

**Propiedades Químicas:** Desde el punto de vista químico, los plásticos, a bajas temperaturas, son generalmente más resistentes a los ambientes que atacan a los metales, al concreto y a la madera.

En general, los plásticos resisten los ataques del agua, pero son muy sensibles a la luz solar (rayos ultravioletas) y soportan bien los ataques atmosféricos.

**Propiedades Térmicas:** Los plásticos son generalmente malos conductores del calor, pero puede agregarse aditivos para mejorar la conductividad térmica.

El coeficiente de dilatación térmica es alto en la mayoría de los plásticos. Se producen grandes deformaciones, en comparación con los metales, mediante aumentos de temperatura relativamente pequeños.

**Propiedades ópticas:** Los plásticos presentan una gama muy amplia de propiedades ópticas. Así, en cuanto a la refracción de la luz, los polímeros pueden ser opacos, translucidos o transparentes. Algunos son muy brillantes, otros no la reflejan y sus superficies son del tipo mate.

Las propiedades ópticas mencionadas anteriormente, combinadas con la adición de colorantes, le proporcionan a los objetos de plástico una apariencia muy atractiva.

## 1.6 Aplicaciones

Los plásticos tienen cada vez más aplicaciones industriales y de consumo. El uso de un plástico para una aplicación específica depende de su composición, propiedades particulares y su diseño. Las propiedades de un polímero, tanto físicas como químicas, son de muchos aspectos tan sensibles a los cambios de estructura al monómero, como son las propiedades del monómero mismo. Esto significa que, hasta un grado bastante considerable, las propiedades de un polímero pueden adecuarse a las aplicaciones particulares prácticas. Las resinas sintéticas son la principal fuente de plásticos, seguidas de cerca por los derivados de la celulosa.

El HDPE se usa en tuberías, del mismo modo que el PVC. Éste se emplea también en forma de lámina como material de construcción. Muchos plásticos se utilizan para aislar cables e hilos, y el poliestireno aplicado en forma de espuma sirve para aislar paredes y techos. También se hacen con plástico marcos para puertas, ventanas y techos, molduras y otros artículos.

Otros sectores industriales, en especial la fabricación de motores, dependen también de estos materiales. Algunos plásticos muy resistentes se utilizan para fabricar piezas de motores, como colectores de toma de aire, tubos de combustible, botes de emisión, bombas de combustible y aparatos electrónicos. Muchas carrocerías de automóviles están hechas con plástico reforzado con fibra de vidrio.

Los plásticos se emplean también para fabricar equipos de oficina, dispositivos electrónicos, accesorios pequeños y herramientas. Entre las aplicaciones del plástico en productos de consumo se encuentran los juguetes, las maletas y artículos deportivos.

Una de las aplicaciones principales del plástico es el empaquetado. Se comercializa una gran cantidad de polietileno de baja densidad en forma de rollos de plástico transparente para envoltorios. El polietileno de alta densidad se usa para películas plásticas más gruesas, como la que se emplea en las bolsas de basura. Se utilizan también en el empaquetado: el polipropileno, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC) y el policloruro de vinilideno. De la misma forma, el polipropileno es una buena barrera contra el vapor de agua; tiene

aplicaciones domésticas y se emplea en forma de fibra para fabricar alfombras y sogas [12,13].

### **1.7 Clasificación de los plásticos**

Teniendo en cuenta la distribución de entrelazado de las macromoléculas, podemos clasificar los plásticos en tres grandes grupos: termoplásticos, termoestables, y elastómeros [10].

#### ➤ Plásticos Termoplásticos

Los termoplásticos están constituidos por cadenas unidas entre sí débilmente .Es un tipo de plástico que permite calentar, moldear y enfriar en un número de veces indefinidas. En la tabla 2. se muestra algunos ejemplos de estos plásticos.

**Tabla 2.Principales Plásticos Termoplásticos[7]**

NOMBRE		PROPIEDADES	APLICACIONES
Policloruro de vinilo (PVC)		Amplio rango de dureza Impermeable	Tubos, desagües, puertas, ventanas.
Poliestireno (PS)	Duro	Transparente pigmentable.	Juguetes, pilotos coche
	Expandido (porexán)	Esponjoso y blando.	Aislamiento térmico y acústico, envasado, embalaje (“corcho blanco”).
<a href="#">Polietileno</a> (PE)	Alta densidad	Rígido, resistente y transparente.	Utensilios domésticos (cubos, juguetes).
	<a href="#">Baja densidad</a>	Blando y ligero, transparente.	Depósitos, envases alimenticios.
<a href="#">Metacrilato</a> (plexiglás)		Transparente.	Faros, pilotos de automóvil, ventanas, carteles luminosos, gafas de protección, relojes, etc.
<a href="#">Teflón</a> (fluorocarbonato)		Deslizante. Antideslizante.	Utensilios de cocina (sartenes, paletas, etc.), superficies de encimeras.
<a href="#">Nailon</a> (PA poliamida)		Flexible y resistente a la tracción, translucido, brillante	Hilo de pescar, levas, engranajes, tejidos, medias.
<a href="#">Celofán</a>		Transparente (con o sin color). Flexible y resistente. Brillante y adherente.	Embalaje, envasado, empaquetado.
Polipropileno (PP)		Translucido, flexible resistente.	Tapas de envases, bolsas, carcasas.
Poliéster (PET)		Flexible, resistente, brillante.	Botellas de agua, envases champú, limpieza.

➤ Plásticos Termoestables

Están formados por cadenas enlazadas fuertemente en distintas direcciones. Al someterlos al calor, se vuelven rígidos, por lo que sólo pueden calentarse una vez y no se deforman.

En general presentan una superficie dura y extremadamente resistente, y son más frágiles que los termoplásticos. En la tabla 3. se muestran los plásticos termoestables como sus aplicaciones.

**Tabla 3.Principales Plásticos Termoestables[7]**

Nombre	Propiedades	Aplicaciones
Poliuretano (PUR)	Esponjosa y flexible. Blando macizo. Elástico y adherente	Espuma para colchones y asientos, esponjosas, aislamientos térmicos y acústicos, juntas, correas de transmisión de movimientos, ruedas de fricción, pegamentos y barnices.
Resinas fenólicas (PH): Baquelitas	Con fibras de vidrio son resistentes al choque. Con amianto, son termorresistentes. Color negro o muy oscuro. Aislantes eléctricos	Mangos y asas de utensilios de cocina, ruedas dentadas, carcasas de electrodomésticos, aspiradores, aparatos de teléfonos, enchufes interruptores, ceniceros.
Melamina	Ligera Resistente y considerable dureza Sin olor ni sabor. Aislante térmico	Accesorios eléctricos, aislantes térmicos y acústico, encimeras de cocina, vajillas , recipientes de alimentos.

➤ Plásticos Elastómeros

Un elastómero es un polímero que cuenta con la particularidad de ser muy elástico pudiendo incluso, recuperar su forma luego de ser deformado. Debido a estas características, los elastómeros, son el material básico de fabricación de otros materiales como la goma, ya sea natural o sintética, y para algunos productos adhesivos.

A modo más específico, un elastómero, es un compuesto químico formado por miles de moléculas denominadas monómeros, los que se unen formando enormes cadenas. Es gracias a estas grandes cadenas que los polímeros son elásticos ya que son flexibles y se encuentran entrelazadas de manera muy desordenada.

Cuando un elastómero es estirado, sus moléculas se alinean, permitiendo que muchas veces tomen un aspecto cristalino. Sin embargo, una vez que se suelta, rápidamente, vuelve a su

estado original de elástico desorden. Lo anterior distingue a los elastómeros de los polímeros plásticos.

Para modificar algunas de las características de los elastómeros, es posible añadir otros elementos como el cloro, obteniendo así el neopreno tan utilizado en los trajes húmedos para bucear.

Para poder darle un uso más práctico a los elastómeros, estos deben ser sometidos a diversos tratamientos. A través de la aplicación de átomos de azufre, este polímero se hace más resistente gracias a un proceso denominado vulcanización. Si además se le agrega otro tipo de sustancias químicas es posible lograr un producto final bastante resistente a las amenazas corrosivas presentes en el medio ambiente. En la tabla 4. se mencionan algunos ejemplos de plásticos elastómeros como sus propiedades y aplicaciones.

**Tabla 4. Principales Plásticos Elastómeros[7]**

Nombre	Obtención	Propiedades	Aplicaciones
Caucho natural	Látex	Resistente e inerte	Aislamiento Térmico y eléctrico, colchones, neumáticos...
Caucho sintético	Derivados del petróleo	Resistentes a agentes químicos	Neumáticos, volantes, parachoques, pavimentos, tuberías, mangueras, esponjas de baño, cuantes, colchones...
Neopreno	Caucho sintético	Mejora las propiedades del caucho sintético: es más duro y resistente. Impermeable.	Trajes de inmersión, juntas, mangueras, guantes...

## **CAPITULO II**

### **GENERALIDADES DEL PET**

El descubrimiento del Polietilentereftalato mejor conocido como PET, a presentado un alto desarrollo tecnológico hasta lograr un nivel sofisticado, basado en su espectacular proliferación a nivel mundial y la diversificación en aplicaciones cotidianas.

Este plástico representa el 5% de residuos municipales en México y el 7% en E.U.A. Es el más utilizado en la fabricación de botellas transparentes para refresco, debido a que es el único plástico que soporta la carbonación de estas bebidas. Cabe mencionar que es el plástico más reciclado en E.U.A y las botellas de PET constituyen entre un 30-40% de las botellas recicladas en este país.

Al PET por sus siglas en ingles, se le ha asignado dentro de la clasificación de la Sociedad de Plásticos Industriales de E.U.A. [12, 14,15].

#### **2.1 Definición de PET**

El PET, es un poliéster termoplástico de alto peso molecular. La palabra poliéster tiene dos componentes “poli y ester”, poli es definido como muchos o más que uno, por consiguiente “poliéster” significa muchos esteres unidos en una configuración en cadena. Un ester definido como un compuesto formado por la reacción de un ácido orgánico y un alcohol [15,17].

#### **2.2 Marco Histórico**

El PET, también conocido como tereftalato de polietileno, fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickson en 1941. La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955; desde entonces, el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico hasta lograr un alto nivel de sofisticación basado en el crecimiento de la demanda del producto a escala mundial y a la diversificación de sus posibilidades de uso.

Whinfield y Dickson junto con los inventores W. K. Birtwhistle y C. G. Ritchie they crearon la primera fibra de poliéster llamada Terileno en 1941 (primera producción de Industria Química Imperial o ICI). La segunda fibra de poliéster fue el Dacrón de DuPont. Según DuPont, “en 1920 DuPont estaba en competencia directa con Industria Química Imperial. DuPont e ICI acordaron en octubre de 1929 compartir información acerca de las patentes e investigaciones desarrolladas. En 1952, la alianza de las compañías fue disuelta. El polímero que después llegó a ser poliestireno tiene inicios en las escrituras de Wallace Carothers. Sin embargo, DuPont se dedicó a concentrarse en una investigación más prometedora, el nylon. Cuando DuPont reasumió su investigación del poliéster, la ICI había patentado el poliestireno de Terileno. En 1950, una planta piloto en Seaford, Delaware, facilitó la producción de la fibra de Dacrón (poliéster) con la modificación de la tecnología del nylon.

A partir de 1976 se comenzó a usar el PET para la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes principalmente para bebidas, sin embargo el PET ha tenido un desarrollo extraordinario para empaques.

A lo largo de los 20 años que lleva en el mercado, el PET se ha diversificado en múltiples sectores, sustituyendo a materiales tradicionalmente implantados o planteando nuevas alternativas de envasado hasta el momento.

Esta diversificación tan importante ha originado que el PET haya experimentado un gran crecimiento en su consumo y que siga siendo el material de embalaje que actualmente presenta las mayores expectativas de crecimiento a nivel mundial [8, 18,19, 20,21].

### **2.3 Obtención de resinas PET**

El PET se obtiene de dos materias primas principales derivadas del petróleo y son el etileno y el paraxileno, los cuales a su vez, se utilizan para producir etilén glicol y ácido tereftálico, respectivamente. Son puestos a reaccionar a temperatura y presión elevadas para obtener la resina del PET en estado amorfo.

La resina se cristaliza y polimeriza para incrementar su peso molecular y su viscosidad: El resultado es la resina que se usa para fabricar envases. Su apariencia es la de pequeños

cilindros de color blanquizco llamados chips. Una vez seca, se almacena en silos para después ser procesada [8,19].

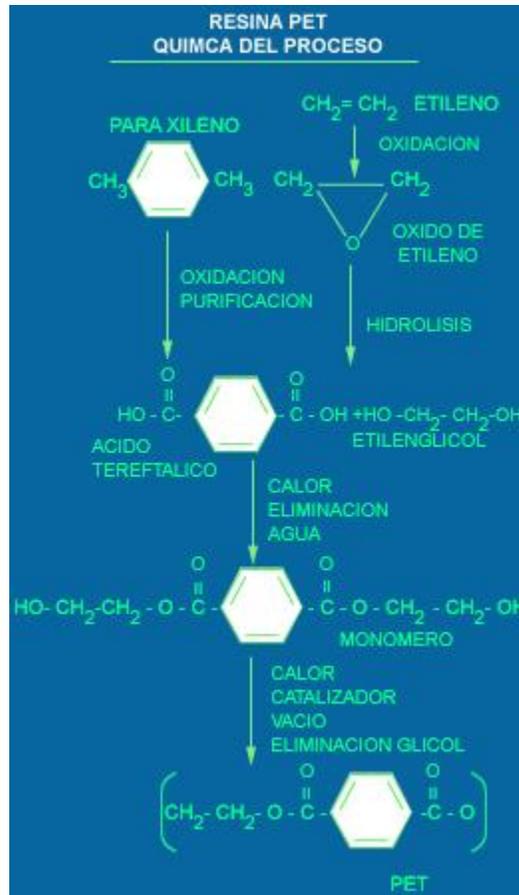
### **2.3.1 Reacción para la obtención de resina PET**

Existen dos reacciones básicas para la elaboración del PET que son la esterificación directa y la transesterificación, como rutas de procesamiento para su elaboración.

El ácido tereftálico se obtiene a partir del paraxileno y el etilen glicol se obtiene a partir del etileno, donde el etilen glicol es el reactivo limitante en la reacción de esterificación para la producción de poliéster que se obtiene a partir del óxido de etileno.

En la primera fase se obtiene un éster; mediante un proceso de policondensación se convierte en un poliéster, el cual es obligado a pasar por un dado de orificios múltiples para obtener un tipo espagueti que se enfría en agua, una vez semi-sólido es cortado en un pelletizador de alta velocidad para obtener el granulado de PET.

En la segunda fase, el PET amorfo pasa a un precristalizador de fase sólida en donde se obtiene la viscosidad deseada, mejorando en forma simultánea el contenido de acetaldehído, el peso molecular y la cristalinidad (desde un 6% en amorfo hasta un 52% cristalino). Finalmente el polímero se enfría para ser envasado y distribuido para posteriormente ser convertido en envase por el proceso de estirado-soplado. En la figura No. 1 y 2 se muestra la secuencia de la reacción de obtención del PET.



**Figura 1. Reacción de obtención de PET. [42]**



**Figura 2. Reacción sintetizada. [42]**

### **2.3.2 Materias Primas**

Las materias primas que son necesarias para la producción de PET se elaboran en PEMEX a nivel nacional y a nivel mundial son producidos por grandes corporaciones petroquímicas.

Acido tereftálico: Se elabora totalmente en México a partir del paraxileno, materia prima que produce PEMEX, quien abastece a los dos fabricantes en México; que son Petrocel y Tereftalatos Mexicanos.

Etilén glicol: Es el reactivo limitante en la reacción de esterificación para la producción de poliéster, que se obtiene a partir del óxido de etileno que produce también Petróleos Mexicanos [8, 19,20].

### **2.4 Producción del PET**

El etilén glicol usado para producir PET, se obtiene a partir del gas natural (nafta parafínica) como etano y propano, donde una planta de cracking los convierte en etileno, la cuál puede reaccionar con oxígeno y agua produciendo el EG (etilén glicol), que es un compuesto líquido transparente con sabor dulce.

El componente ácido del PET también se obtiene a partir del petróleo crudo, la corriente ligera de naftas aromáticas pasa a través de un reformador, el cuál produce gasolinas y una fracción aromática es refinada como BTX.

A partir de la corriente de BTX, se extrae el p-xileno, el cuáles usado en presencia de oxígeno como materia prima para producir el ácido tereftálico, en el cuál su estado físico es un polvo fino blanco con tamaño de partícula promedio a 35 micrones.

El ácido tereftálico y el etilén glicol reaccionan aplicando una presión de 3 a 4 Kg/cm<sup>2</sup> M y temperatura de 280 °C; la reacción es una esterificación directa, eliminando agua como subproducto. Posteriormente el monómero formado se transfiere a otro reactor donde se agrega el catalizador, se incrementa la temperatura entre 300 a 310 °C y aplicando vacío, se

logra la producción del PET, cuya presentación es en forma de pelets o chips. En la siguiente figura se muestra de manera general la obtención de PET [17,22].



Figura 3. Proceso de obtención del PET. [42]

## 2.5 Clasificación del PET

Al PET se le clasifica según sus aplicaciones o usos que este pueda tener y según sus características de polimerización, el PET puede clasificarse en cuatro grados:

- 1.- Grado fibra
- 2.-Grado película y lámina
- 3.- Grado botella
- 4.- Grado ingeniería

Las diferentes grados de resina de PET se diferencian por su peso molecular, las que presentan menor peso molecular se denominan de grado fibra, las de peso molecular medio son grado película y las de mayor peso molecular grado botella y grado ingeniería.

### **2.5.1 PET grado fibra**

Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.): En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir.

Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

La resina de PET grado fibra absorbe la humedad del medio ambiente, por lo cual el tratamiento previo de la resina implica la operación de secado, que se lleva a cabo mediante el uso de equipos especiales que usan aire seco para extraer la humedad del material dejándolo en un nivel óptimo para procesarse.

### **2.5.2 PET grado película y lámina**

Se caracteriza por su alta resistencia a la tensión, elevada transparencia y brillo superficial, destacando por sus propiedades de barrera a gases, principalmente al CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>, así como el paso a los olores. Posee baja retención de humedad, no es tóxica y es inerte a la formación de hongos y bacterias, esto lo hace ideal en aplicaciones del sector de envase y empaque para laminaciones con aluminio, papel y otros plásticos útiles para prolongar la vida de anaquel de artículos perecederos.

Por sus excelentes propiedades de resistencia química a disolventes orgánicos, alcoholes y aceites se utilizan en la fabricación de películas sensibilizadas para fotografía y rayos X y es apropiada para la metalización y tratamientos de impresión.

### **2.5.3 PET grado botella**

Es un producto que no requiere en su elaboración aditivos, por lo que se le considera completamente puro e inerte. Presenta excelentes propiedades de barrera a gases, especialmente al CO<sub>2</sub>, ideal para el almacenamiento de bebidas gaseosas. Posee muy buena resistencia al impacto y a la tensión.

### **2.5.4 PET grado ingeniería**

Presenta propiedades de brillantez y estructura cristalina. En su forma natural es un material fácilmente inflamable, funde y gotea; la flama permanece aún después de alejarla del contacto con el fuego, es de color amarillo y desprende humos negros de olor irritante. Es un material semidirigido de gran resistencia a la deformación, tenacidad, alta estabilidad dimensional, bajos coeficientes estáticos y de fricción y de buena resistencia al impacto.

Actualmente la resina de PET grado ingeniería, son formulas por sus productores a partir de PET virgen o grado botella. A este material grado ingeniería se le agregan tres tipos de sustancias; un agente nucleador para promover una cristalización rápida y uniforme, materiales orgánicos que modifican la estructura química del polímero y materiales como la fibra de vidrio que refuerzan la estructura de los productos moldeados.

## **2.6 Propiedades generales del PET**

Debido a sus buenas propiedades el PET cuenta con la aprobación de Salubridad suscrita a la SSA (Secretaría de Salud), dependencia que avala su uso, la cuál a su vez se basa en algunos apartados de la FDA (Federal Drug Administration), que en ese sentido tiene varias aplicaciones siendo la principal, los alimentos. También presenta varias propiedades que lo distinguen de los demás polímeros existentes en la actualidad como; propiedades ópticas, de barrera, mecánicas, transportación, térmicas, etc.

Propiedades ópticas; Dentro de estas propiedades se da la transparencia, como cristal y pueden ser pigmentados en una gama de colores, utilizando concentrados de color.

Propiedades de barrera; El PET cuenta con buenas propiedades de barrera al vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono.

Propiedades mecánicas; Este presenta gran resistencia al impacto y a la compresión.

Propiedades de transportación; En esta propiedad se da ligereza, ya que dada sus propiedades mecánicas se puede fabricar productos con paredes delgadas y por tanto más ligeras y muy económicas [18, 20 ,21].

## **2.7 Aplicaciones del PET**

La aplicación del PET es muy vasta como en; bebidas carbonatadas, agua purificada, aceites comestibles, alimentos, farmacéuticos, licores, cosméticos, agroquímicos, electrónicos, construcción y muchos otros sectores en la industria.

El PET grado fibra; A encontrado aplicaciones como en prendas de vestir, telas para uso doméstico, telas industriales y cordelería. Debido a su resistencia se emplea también en partes para cinturón de seguridad y refuerzo de llantas, por su baja elongación y alta tenacidad se usa en mangueras.

El PET grado película y lámina; La película se destina al empaque de alimentos, se emplea como base para laminados termosellables o metalizados. Recientes desarrollos ofrecen una película de PET metalizada con aluminio por un lado y recubierta por ambos lados con PVDC (policloruro de vinilideno) sellable térmicamente. Su uso es para el empaque de productos muy sensibles a la humedad que requieren larga vida en anaquel como los dulces, galletas, fármacos, reactivos y polvos para preparar bebidas.

Otro desarrollo es el de la película que se encuentra químicamente preparada, para asegurar la adhesión de tintas y recubrimientos que no se adhieren bien a su material. Se puede imprimir, recubrir, laminar, metalizar y colorear. Las cintas magnéticas para la computación, audio y video son hechas de películas de PET.

El PET grado botella; Su aplicación y su uso para envase, es muy amplia ya que este posee buenas propiedades de barrera de gases y resistencia química, por ser cristalino y transformable en condiciones especiales, proporciona piezas altamente transparentes y de gran brillo similar al cristal, además de poseer bajo peso, gran resistencia al impacto y

tensión. Por lo anteriormente expuesto, el PET se utiliza en la fabricación de botella, tarros y frascos para envasar bebidas, alimentos, productos cosméticos y farmacéuticos entre los que sobresalen, aguas, refrescos, jugos, vinos, licores, aceites comestibles, aderezos para ensaladas, vinagre, salsas, mermeladas, productos lácteos, shampoo, lociones, artículos de tocador y medicamentos principalmente, en la siguiente tabla se muestran las clasificaciones del PET grado botella de acuerdo a su aplicación. En la tabla 5 se observan las aplicaciones del PET grado botella.

**Tabla 5. Aplicaciones del PET grado botella. [40]**

<b>Artículo</b>	<b>Aplicaciones</b>
Botella	Aceites comestibles Jugos de frutas Mostazas Aderezos para ensaladas Vinagre Otros
Tarro	Alimentos para beber Salsa Mermeladas Nueces Café y crema Mayonesas
Bebidas	Refrescos Cervezas Bebidas carbonatadas Agua mineral Chanpañá Vinos Sidras Licores
Artículos de tocador	Shampoo Lociones Cosméticos

El PET tiene muchas otras aplicaciones como grado ingeniería tanto a nivel industrial como laminado para otros polímeros del sector doméstico, se muestran algunas de las principales aplicaciones.

Usos electrodomésticos; Se usan en bases de aparatos de mediano y pequeño tamaño, tostadores, hornos de convección, freidoras, tenazas eléctricas, sartenes eléctricos, planchas de cabello y asa.

Uso eléctrico-electrónico; Se usa para la fabricación de cintas magnéticas, rayos X y otra películas fotográficas, aislamiento eléctrico (para capacitares y condensadores), en la fabricación de piezas para carcazas, motores eléctricos, engranes, bases de elevadores, transformadores, copadoras, capacitares y contactos.

Uso automotriz; La resina del PET han hecho posible su uso en la industria automotriz, encontrándoseles en componentes tanto decorativos como funcionales, en defensas, paneles de carrocería y conectores eléctricos.

Uso de plomería y cerrajería; El volumen de este sector es pequeño, se espera que el consumo se incremente cuando se requiera una mayor resistencia en la aplicación. Las aplicaciones típicas son armaduras o carcazas de bombas, componentes de albercas, propulsores, componentes de válvulas, componentes de calentadores de agua, soportes, broches, partes de herramientas , cerraduras de puertas, válvulas de irrigación, cámaras de medidores de agua, rociadores mecánicos y para reemplazar partes metálicas en elementos sujetos a esfuerzos mecánicos[18, 19, 23, 24,25].

## **2.8 Definición de envase**

Envase primario: Es aquel que esta en contacto directo con el producto.

Envase secundario: Es la envoltura o caja que contiene el envase primario [17,22, 26].

### **2.8.1 Introducción de envases PET en el mercado**

El PET es un material de empaque totalmente compatible con los alimentos, por lo cuál no es necesario emplear diferentes formulaciones para cada aplicación, además la resina de

PET grado botella cuenta en E.U.A. y México con aprobaciones de la FDA y la SSA, entre otras [17,20].

En México el grado botella fue lanzado por Celanese Corporation en 1985 con el nombre de TERCEL, abriendo de esta manera una alternativa más atractiva y versátil para la presentación de productos y reduciendo costos de producción. En el mismo año KIMEX también comercializa el PET con el nombre de KIMEPET. Sin embargo, la aparición de productos envasados en PET no fue posible hasta finales de 1986 con la presentación de algunas salsas, jarabes, y para 1988, se utilizó en el envasado de bebidas carbonatadas, aceites comestibles, aceitunas y bebidas de sabores, en pequeña proporción.

Los envases de PET hicieron su aparición en el año de 1977 en Estados Unidos, siendo patentados por ICI como MELINART PET; en 1978 había capacidad instalada de 1000 millones de botellas anuales y ya para 1980 creció hasta 3340 millones al año, se estimó que en 1987 se fabricaron 8000 millones de botellas.

El mayor consumo de este producto en Estados Unidos fue en botellas de 2L. En el mercado Europeo, se dio la mayor proyección a los envases para bebidas carbonatadas, principalmente para 1.5L y 2L. El mercado Europeo Occidental estuvo dominado principalmente por el Reino Unido, que en 1980 tuvo una producción de 300 millones de envases anuales y para 1985 400 millones de botellas de 1.5L y 2L. Los países productores fueron: Inglaterra, Francia, Alemania, Suiza, Bélgica y Holanda.

En el Oriente, Japón y Corea del Sur fueron los principales productores; Japón fue el primero en introducir envases PET en 1977, iniciando su producción de resina con 240 toneladas al mes y ya para 1985 su capacidad instalada fue de 9000 toneladas. Los principales usos del mercado japonés fueron para bebidas carbonatadas y salsa de soya con un 3% para el primero y un 28.5 para el segundo. Corea produjo un total de 400 millones de botellas para ese año [19, 24, 27, 28].

## 2.8.2 Producción de envases PET

Este puede ser transformado en botella mediante un proceso llamado biorientación de preformas o conocido como inyección-soplado, las cuales son moldeables en equipos de inyección. El moldeado de las preformas consiste en la inyección del polímero fundido en la cavidad del molde hasta llenarlo. Una vez lleno, la resina del polímero fundido es enfriada rápidamente para obtener así una pieza con excelente transparencia, libre de deformaciones y una magnífica exactitud dimensional lo cual es esencial para obtener botellas de excelente calidad.

Existen dos tipos de instalaciones par fabricar envases PET:

### *Sistema de dos etapas:*

En este sistema, la primera etapa consiste en inyectar una preforma en un equipo de inyección el cuál deberá tener ciertas características especiales para que pueda procesar la resina y obtener de él un rendimiento óptimo en cuanto a sus propiedades físicas y de transparencia. Los moldes deben de ser de colada caliente se trata de e niveles de procesamiento, así el material que se encuentra dentro del equipo deberá tener un ligero acondicionamiento para la obtención del producto, a su vez el equipo debe tener un sistema de refrigeración muy eficiente. Estos moldes suelen tener desde 16 hasta 96 cavidades. Una vez que las preformas están suficientemente frías para que no se deformen o se peguen entre sí, son expulsadas y posteriormente enviadas a donde se localice el equipo de soplado, el cual puede estar en la misma planta o en cualquier otro lugar.

La segunda etapa del proceso consiste en calentar la preformas hasta una temperatura tal que puedan ser estiradas y sopladas, en un equipo de soplado de alta productividad que normalmente se encuentra localizado en las plantas embotelladoras.

### *Sistema integrado de una etapa:*

En este sistema, se realiza el moldeo de la preforma y el soplado de la misma, para obtener el envase en una sola máquina (los procesos de inyección y soplado están

integrados en una sola unidad), por lo que no es necesario sacar las preformas de la máquina para que puedan ser sopladas y llevarlas a su forma y tamaño definitivos.

Dentro de los procesos de producción de este material existen otros de gran importancia como; Extrusión, Inyección, Termoformado, Rotomoldeo, entre otros.

En la tabla 6. se encuentra las ventajas de ambos sistemas.

**Tabla 6. Comparación entre los sistemas de fabricación.**

SISTEMA	VENTAJAS
Sistema de 2 etapas	-Adecuado para grandes producciones, más de 20 millones de botellas/año. -Permite centralizar la producción de preformas para suministrarlas a diferentes plantas de soplado.
Sistema de 1 etapa	-Menor inversión inicial. -Adecuado para varios tipos de productos, o para capacidades de producción bajas, con diseños de envases más complejos, bocas anchas y multicapas [20,27].

### 2.8.3 Propiedades de envases PET

Propiedades mecánica; Presentan buena resistencia al impacto, bajo coeficiente de expansión al presurizarse, resistencia hasta 12 Kg/cm<sup>2</sup> y buena resistencia a la carga vertical.

Propiedades de barrera; Es el plástico con mejor barrera al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dentro de los llamados barrera.

Propiedades de pureza; Cuenta con las aprobaciones correspondientes de la FDA y la SSA para ser utilizado como envase para alimentos.

Ligereza: Debido a sus excelentes propiedades mecánicas se pueden obtener envases con paredes más delgadas, que traen como consecuencia, envases más ligeros y económicos.

Transparencia; Los envases de PET son transparentes como el cristal y pueden ser ofrecidos en una gama muy grande de colores, utilizando concentrados de color.

Facilidad para la impresión; Se puede utilizar las tintas más comunes de impresión, y no se requiere dar un tratamiento previo al envase para que se adhieran los colorantes [13,20].

#### **2.8.4 Como se identifica**

La manera más fácil de saber si un envase está fabricado con resina PET, es buscar en el fondo un símbolo de un triángulo formado por flechas con el número "1"(como se muestra en la figura 4) en el centro y bajo este, las siglas PET. Este símbolo se forma en el proceso de fabricación y algunas veces se imprime en la etiqueta.



**Figura 4. Identificación del PET**

#### **2.8.5 Mercado nacional del PET**

El PET es uno de los materiales más utilizados para el empaque y embalaje de diversos productos. En México, actualmente existen 5 plantas productivas que elaboran polímero en gránulo (chip) de PET. Durante el 2000 se produjeron en las plantas mexicanas 502,100 toneladas de PET, de las cuales se exportaron 75,000 toneladas, además se importaron 40,000 toneladas de este material. Se estima que en el año 2000 el consumo de PET a escala nacional fue de 467,100 toneladas. El incremento anual de la demanda de este material es del 13.1%.

Actualmente, el principal mercado consumidor de envases de PET es el sector de bebidas carbonatadas, las cuales representan el 57% del consumo.

En segundo lugar está el aceite comestible, con 16%, seguido del segmento de aguas purificadas con 15%.



## **CAPITULO III**

### **RESIDUOS DE ENVASES PET**

La proliferación en la producción de envases y embalaje contribuye a un serio problema para la gestión de los residuos urbanos y casi todos han debido legislar sobre ello. Algunos países han desarrollado medidas legislativas como la retornabilidad y la reglamentación en el uso de materiales para reciclado.

Gracias al desarrollo de la industria plástica se ha podido contribuir a los cambios y avances de diversos sectores importantes, en los que se encuentran: industrial, alimentos, farmacéuticos, agrícolas y comunicaciones. Por lo anterior se sabe que algunos convenientes que tiene el utilizar plásticos, más aún si estos se reciclan sería un logro importante, que hoy en día es importante y posible.

El uso actual de los plásticos esta creciendo a grandes pasos, propiciando a que posteriormente estos materiales se conviertan en desechos, los cuales proporcionan un grave problema en la acumulación de la basura.

Actualmente a nivel mundial se esta haciendo énfasis en los desechos generados por estos materiales, ya que su crecimiento se esta incrementando en un gran porcentaje. Es por eso que se hace énfasis en el cuidado del medio ambiente y de los recursos naturales. El impacto ambiental que esto ocasiona, a puesto en cuestión sus ventajas (PET) como su resistencia a la degradación y a la economía de los materiales, por los que los plásticos se enfrentan a un gran problema, proponiéndose como solución el RECICLAJE.

#### **3.1 Generadores de desechos PET**

Los desechos son generados por diferentes sectores entre los que destacan el comercio, el hogar y la industria por citar algunos. Estos desechos consisten en resinas plásticas o productos plásticos incluyendo el PET que puede ser reprocesados. Aquellos productos que debido a que se encuentran sucios o que han perdido sus propiedades físicas no pueden volver a reprocesarse, porque es más costoso y no existe la tecnología adecuada. Un ejemplo son los garrafones. Estos desechos deben llevarse a rellenos sanitarios o disponerse para su incineración con el fin de aprovechar su energía.

Los principales generadores de desechos se clasifican de la siguiente manera:

- a) Desechos industriales
- b) Desechos post-consumidor (hogar)

Desechos industriales; Se conoce como desecho industrial a todo aquel artículo que es separado antes de formar parte de la basura, de este modo su recuperación es económica y practica, originando que se utilicen de nuevo los materiales.

En la industria de la transformación de los plásticos se obtienen piezas defectuosas y mermas que se separan de acuerdo al tipo de material y se reciclan. Su reutilización es práctica ya que todos estos artículos no han tenido contacto con el usuario o con la basura y están libres de contaminantes como se indica en la tabla 7.

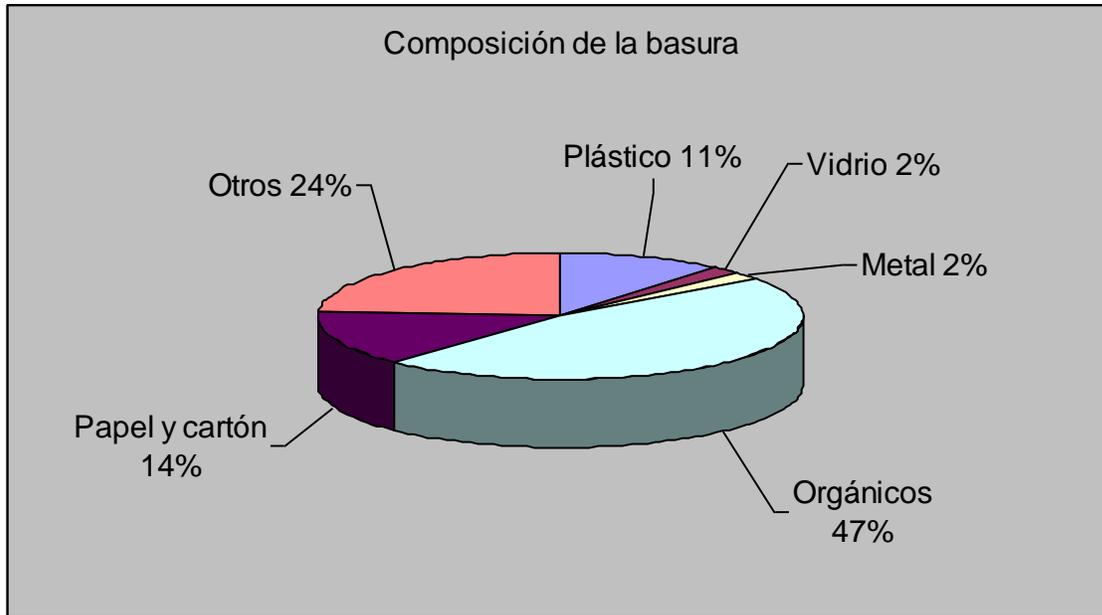
**Tabla 7. Usos de desechos industriales. [38]**

<b>Material</b>	<b>Aplicación</b>
Papel y cartón	Se recicla para fabricar papel
Plástico	Se recicla para fabricar otras piezas de plástico
Metal	Se recicla para piezas metálicas
Vidrio	Se recicla para fabricar vidrio
Materia orgánica	Se fabrica composta
Madera	Se recicla para fabricar piezas más pequeñas
Otros	Se dirigen a confinamientos

Desechos post-consumidor (hogar); La basura en el hogar siempre ha sido un gran problema para la sociedad y el medio ambiente, se considera basura a todo objeto que ya no tiene uso o valor, surgiendo el deseo de eliminarlo. Sin embargo los desperdicios como el cascarón de huevo, una bolsa de plástico, un recipiente de alguna bebida gaseosa, al separarlo se puede manejar y reutilizar.

En México de, los desechos sólidos es el reflejo de la desmedida urbanización, originando un incremento en la generación de basura, sobre todo porque no existen programas de recuperación de desperdicios o simplemente no son bien ejecutados por la población.

En la figura 5 se muestra que la composición de residuos sólidos post-consumidor no es homogénea a nivel nacional sino que corresponde a los hábitos de consumo y poder adquisitivo de la sociedad. [31, 42, 44, 45,46]



**Figura 5. Composición de la basura en México en el 2008. [40]**

### **3.2 Fuentes de desperdicios PET**

Los plásticos generan desperdicios desde la obtención de materias primas, transformación hasta su consumo final. El plástico en sí mismo no es un residuo especial, por tanto acababa su vida útil deviene un residuo poco problemático, en particular de carácter visual. Las fuentes generadoras de dichos desperdicios son: el hogar, comercio, industrias, transformadores y fabricantes de materia prima.

**Hogar:** Los desperdicios plásticos generados por el hogar son películas de empaque, botellas y envases de bebidas, detergentes líquidos, aceites, shampoo y otros artículos desechables que generan el 60% del total de desechos.

Cuando los productos van directamente a la basura se contaminan para su reciclaje, por lo que requiere separarlos y lavarlos.

**Comercio:** Contribuye con el 10% de los desperdicios, este rubro comprende; tiendas, supermercados, cines, restaurantes y centros comerciales en general. Los supermercados desechan películas termoencogibles, utilizadas en el embalaje de cajas, utilizado en frutas, verduras y protección de aparatos domésticos, así como ganchos de ropa. En los cines se desechan: botellas de bebidas, vasos, cucharas, bolsas y envolturas de botanas y dulces. En los restaurantes; los desperdicios que se generan son similares a los del hogar.

Para los supermercados y centros comerciales, existen pequeñas empresas que se dedican a la recolección de los desperdicios plásticos, de forma que se puedan procesar directamente o únicamente requieren de pequeños lavados.

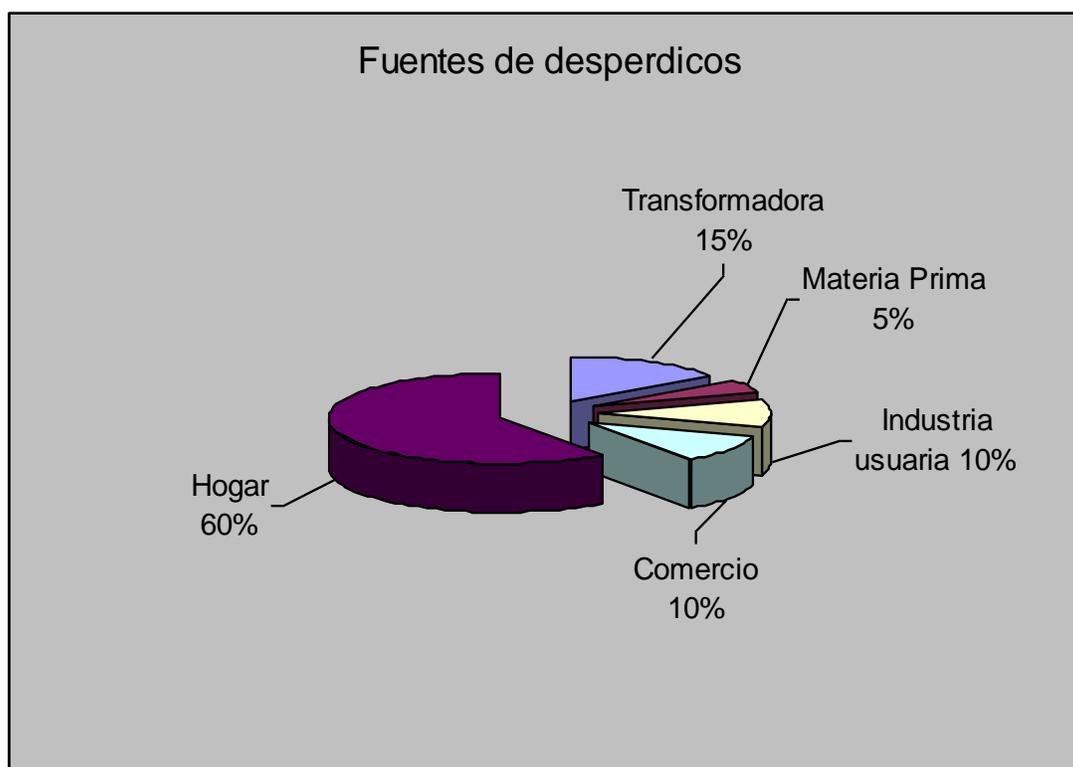
**Industria:** La principal aplicación del PET es en botellas para agua y bebidas carbonatadas, las cuáles para reciclar se recolectan de las compañías refresqueras que las extraen del ciclo de llenado cuando han cumplido con un determinado número de vueltas o porque las botellas se encuentran en malas condiciones. Las industrias de alimentos, cosméticos y productos de limpieza, generan una gran cantidad de desechos plásticos derivados del empaque de sus materias primas, estos desperdicios se contaminan por los productos que contienen y su reciclaje se complica.

**Transformadores:** En la industria transformadora la calidad de los desperdicios depende de los procesos utilizados, la eficiencia del equipo y el tipo de plástico que se maneja. Es común que los desechos se ocupen en la misma empresa para productos de menor calidad, ya que la industria transformadora aporta un 15% del total de desperdicios. Existen productos que aceptan material reciclado, por lo que éste se vende a empresa que lo procesan y comercializan como remolidos.

**Fabricantes de materia prima:** Generan un 5% con el material de purga y limpieza para los reactores, estos plásticos presentan grandes volúmenes, son difíciles de moler y procesar, sin embargo, también deben ser considerados como la fuente de desperdicios, ya que con ciertas tecnologías es posible recuperarlos.

Los residuos plásticos procedentes de la industria acostumbran ser homogéneas y no presentan problemas especiales para su reciclaje [29, 30, 31,47].

En México las fuentes de desperdicios se dividen como se muestra en al figura 6.



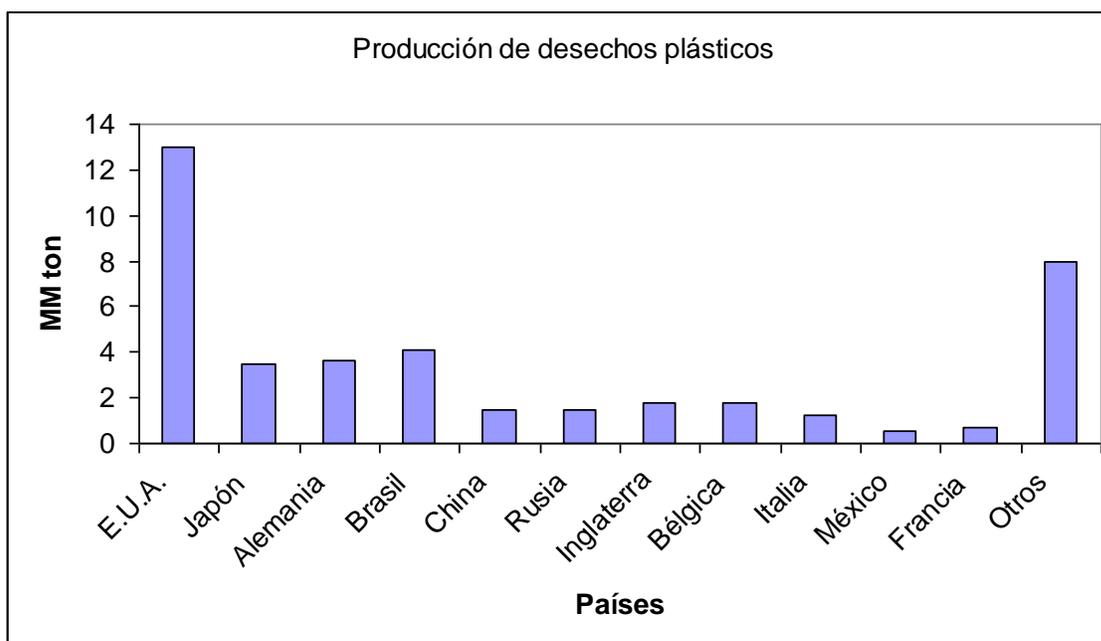
**Figura 6. Fuentes de desperdicios PET en México. [40]**

La generación de desechos plásticos a nivel mundial también ha tenido un incremento vertiginoso, siendo los países del primer mundo los que han generado un desarrollo en el sector industrial y su post-consumo también a crecido, como se muestran la tabla 8 y la figura 7, el porcentaje de desechos plásticos (incluido el PET) en la relación a la cantidad de desechos generados.

**Tabla 8. Millones de toneladas de desechos plásticos. [42]**

Países	MM Toneladas de desechos	% TON plásticos
E.U.A.	260	5
Japón	115	3
Alemania	60	6

Brasil	55	2
China	50	3
Rusia	50	13
Inglaterra	35	5
Bélgica	30	6
Italia	30	4
México	29	2
Francia	22	3
Otros	200	4



**Figura 7. Producción de desechos plásticos. [42]**

### 3.3 Métodos de clasificación de envases PET

Actualmente se están utilizando cuatro métodos básicos para la separación de envases plásticos (PET) para su reciclamiento, que son:

- ❖ **Identificación física:** La separación de envases completos se lleva a cabo manualmente (mediante inspección visual, empleando el código de identificación del material plástico o resina) o automáticamente (mediante un barrido con video y

posterior comparación con modelos de referencia en un banco de datos de una computadora). Sin embargo, con un error humano, los envases deformados o distorsionados (debido al embalado o empacado) pueden conducir a separaciones inadecuadas.

- ❖ **Escaneo químico:** Se emplea para la identificación de envases completos por tipos de polímeros específicos, esto es apreciable normalmente a envases de PVC (donde el cloro puede ser realmente identificado). Más recientemente, las técnicas basadas en análisis del infrarrojo cercano pueden identificar el tipo del material del envase, dando la oportunidad a una selección positiva. También se ha utilizado la técnica de fluorescencia de rayos X para separar envases de PVC y PET. Aunque estos métodos alcanzan un alto nivel de eficiencia, el método puede ser confuso si los envases tienen componentes por ejemplo: etiquetas, tapones, recubrimientos, etc.
- ❖ **Separación mediante densidad:** Las técnicas de flotación se emplean para separar plásticos en forma de escamas de acuerdo con las densidades de los diferentes plásticos. Para las densidades de los materiales más comúnmente empleados en los envases se puede consultar la tabla 9. Es además importante, cuando se seleccionan polímeros para los componentes en el diseño de una botella, evitar cualquiera de tales solapamientos.

**Tabla 9. Densidades de los materiales plásticos en la elaboración de envases. [38]**

<b>Polímero</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
PP	0.90-0.91
LDPE	0.91-0.93
HDPE	0.94-0.96
PS	1.04-1.06
PA	1.13-1.14
PMMA	1.17-1.20
PC	1.2
PET	1.35
PVC	1.35-1.45

- ❖ **Selección electrostática:** Este método emplea las cargas electrostáticas para separar polímeros en forma de escamas. En la práctica, los procesos de separación

normalmente emplean más de uno de estos métodos. Todos usan el método de densidad en el lavado y etapa de clasificación [31, 32,47].

### 3.4 Tratamiento de desechos de PET

Todos los desechos plásticos, incluyendo al PET, tienen una disposición final como residuos, a continuación se mencionarán las técnicas aplicadas a la disposición final de los residuos sólidos (plásticos).

- ❖ **Relleno sanitario:** Este es un lugar legalmente autorizado donde la basura municipal se deposita y es clasificada para su posterior entierro. Se manejan actualmente dos tipos de rellenos sanitarios que son: relleno sanitario mecánico y relleno sanitario rústico. El relleno mecánico, consiste en equipos de la presión para disminuir el volumen lo más posible para que posteriormente se coloque en el relleno. El relleno rústico consiste en el solo depósito de la basura en el relleno ya sea manualmente o con el equipo.
- ❖ **Pepeña:** Es un sistema de clasificación manual de la basura en sus diferentes componentes como vidrio, metales, plásticos y otros. Se realiza en los llamados tiraderos a cielo abierto.

Esta técnica requiere de grandes equipos como camiones recolectores que no compacten la basura para poderla seleccionar, un área que será utilizada por mucho tiempo y que no se encuentre lejos de los centros de producción.

La pepeña no es una técnica eficiente, debido a que un 30% de la basura se queda en barrancas, ríos, calles y el 70% en los tiraderos, sin embargo con esta técnica se aprovecha sólo el 40% ya que el otro 30%, no se puede separar por ser materiales en vías de putrefacción.

- ❖ **Compactación:** Este tratamiento consiste en la reproducción de volumen de los desechos, por la aplicación de altas presiones y posteriormente es depositado en el relleno, este es un ejemplo de relleno sanitario mecánico.

- ❖ **Incineración:** Consiste en eliminar la mayor la parte del volumen de los residuos mediante su combustión con la transformación de los desechos de los gases, cenizas y escorias con el fin de aprovechar la energía producida.
- ❖ **Degradación de plásticos:** También se conoce como pirólisis a la descomposición de elementos orgánicos que contienen los residuos sólidos. Se realiza a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno. Durante el proceso de descomposición, las materias orgánicas se convierten en líquidos, gases y residuos que representan la mitad del volumen inicial.

La ventaja de esta técnica es que controla los gases emitidos y la recuperación de subproductos. La pirólisis se emplea para producir carbón sintético, la recuperación de metanol y ácido acético. Su proceso requiere de reactores especiales para tratar residuos [32, 33, 48].

### **3.5 Secuencias para la disminución de desechos plásticos**

A continuación se muestra una secuencia de acciones para la disminución de desechos plásticos (envases PET). Que consiste en reducir, reutilizar, reciclar, recuperar y fuente de obtención (basura).

1. Reducir: Esto significa utilizar la menor cantidad posible de materiales que se vayan a desechar. Con este propósito se han desarrollado plásticos más resistentes, aditivos y procesos que permitan fabricar productos más ligeros y de espesores menores y diseños ergonómicos. Como ejemplo de lo anterior se han sustituido botellas rígidas por películas flexibles para contener líquidos, con el objetivo de ocupar menores espacios en los centros de acopio y rellenos sanitarios.
2. Reutilizar: Es aprovechar al máximo la vida útil de los productos a través de sistemas de retornabilidad, como es el caso del tema tratado en este trabajo (envases PET) que son utilizados principalmente en bebidas carbonatadas y las cajas donde se transportan, así la empresa fabricante logra un control en el manejo de los productos terminados, disminuyendo el desperdicio y su impacto en la basura.

3. Reciclar: Se aplica una vez los productos ya no pueden ser utilizados para su objetivo original. Sirve para obtener materia prima que será utilizada para fabricar artículos útiles para una segunda aplicación.

4. Recuperar: El concepto de recuperar es el empleo de métodos químicos para obtener materias primas o energía a partir de los desechos plásticos.

5.-Basura: La última etapa en el tratamiento de desechos sólidos es la basura y solamente deberá ser útil para cuando los productos hayan alcanzado su máximo uso y no se justifica su reciclado. [23, 32, 48].

### **3.6 Datos estadísticos sobre el PET en México.**

A continuación se resumen algunos datos estadísticos del **PET**:

#### **Distrito Federal**

- Demanda de PET 55,800 toneladas año
- Envases de PET recuperados 20,500 toneladas año
- Porcentaje recuperado para reciclaje 36.7%

#### **Zona metropolitana de la ciudad de México**

- Demanda de PET 124,000 toneladas al año
- Envases de PET recuperados 48,000 toneladas al año
- Porcentaje recuperado para reciclaje 38.7%

#### **A nivel nacional**

- Demanda de PET 413,000 toneladas año
- Envases de PET recuperados 71,300 toneladas al año
- Porcentaje recuperado para reciclaje 17.3%

Considerando que de las 55,800 toneladas anuales de PET, consumidas por el Distrito Federal, se recuperan alrededor de 20,500 toneladas/año (tasa de recuperación del 36.7%) y que se registran en el Relleno Sanitario de Bordo Poniente 5,146.5 toneladas/año.

Puede decirse que aproximadamente un 54% del PET se encuentra:

- a. En almacén para su distribución o venta, o
- b. Dispuesto inadecuadamente en cauces, calles o tiraderos clandestinos.

Según datos proporcionados por la Asociación Mexicana de Envases y Embalajes, por la Cámara Nacional de Fabricantes de Envases Metálicos, la Cámara Nacional de la Industria de la Celulosa y el Papel, así como por Bancomext, SECOFI e INEGI durante 1998, la participación aproximada de la industria del plástico para la producción de envases a nivel nacional fue de 844 mil toneladas.

Con la información de las gráficas nos dimos cuenta que el PET es el cuarto material más usado por la industria mexicana. En cuanto al plástico la industria del envase es la más importante seguida de la del embalaje, donde ésta sitúa al PET en el segundo lugar de los materiales que más usan.

De la producción total de PET el 52% es para el envasado de bebidas carbonatadas y si tomamos en cuenta que para fabricar estos envases implica un gasto de energía, que en las plantas donde se refina el petróleo, donde se pelletiza para después ser convertido en preformas y luego en envases se genera gran cantidad de efluentes y emisiones atmosféricas que sumados es un daño importante al medio ambiente. Esta comprobado que para fabricar un solo envase de 500 ml se contamina el aire y el suelo más que en uno de 3 litros.

De los envases que se originan en el Distrito Federal el 9% terminan en los tiraderos del interior de la república, mientras que en la Ciudad de México se recupera el 27% de los envases que no se pierden en tiraderos clandestinos, calles, y ríos.

De acuerdo con el secretario de Medio Ambiente, en México se producen 630 mil toneladas de PET al año, de las cuales la industria refresquera genera 365 mil toneladas de ese desecho, sin embargo declaró que con esa planta se podrá reciclar 20 por ciento de éste.

A continuación se muestra el consumo de los plásticos más utilizados por la industria donde se destaca al PET como el cuarto más usado:

**Plásticos (en toneladas):**

- Polietileno de baja densidad (PEBD) = 1314 ton
- Polietileno de alta densidad (PEAD) = 1022 ton
- Tereftalato de polietileno (PET) = 633
- Polipropileno (PP) = 974
- Poliestireno (PS) = 389
- Policloruro de vinilo (PVC) = 535
- TOTAL = 6424 t [39].

### **3.7 Efecto del reciclaje de PET en el medio ambiente**

A nivel mundial es considerado un polímero no contaminante. Al procesarlo o cuando se lo incinera a elevadas temperaturas, no genera sustancias tóxicas como ocurre con el PVC.

La resistencia al agua y al ataque químico es una característica durante la vida útil de los plásticos. Esta cualidad se observa a veces como un factor negativo una vez que los plásticos se descartan. Si bien es cierto que, una vez descartados, los residuos plásticos permanecerán inalterados por muchos años, también representan un componente estable y seguro que no agredirá al ambiente.

Sin embargo, los volúmenes generados de éste residuo son cada vez mayores y presentan una dificultad seria en cuanto a contaminación al medio ambiente y a su manejo.

El daño ambiental asociado a los residuos de PET, está directamente vinculado al mal manejo y disposición que de ellos se hace.

Tomando en cuenta que los plásticos PET son no biodegradables, tienen la característica de ser muy populares y tienen también la propiedad de poder preservar alimentos y sustancias medicinales y orgánicas en general, con una versatilidad y facilidad de manejo, manteniéndose completamente inertes frente a las sustancias que contienen, y frente al medio ambiente.

Los vertederos no controlados, debido a la producción de metano, en su proceso de biodegradación, hacen que el residuo proveniente del PET sea un potencial generador de combustible para los procesos de degradación y al prender fuego, interrumpe el ciclo normal de la descomposición de la materia orgánica, con consecuencias nefastas al ambiente y a la calidad de aire en los lugares cercanos. Este último es un concepto importante y es necesario recalcarlo: los plásticos son inertes, es decir, no contaminan a través de su composición propia. Es la disposición irresponsable en el medio que produce otro tipo de contaminación de ningún modo atribuible al residuo plástico, sino a sus usuarios.

Los daños que se producen son:

- ❖ Contaminación de fuentes de agua (ríos, lagos)
- ❖ Contaminación visual de carreteras y centros turísticos
- ❖ Proliferación en botaderos clandestinos y en las viviendas
- ❖ Contribuyen en acortar la vida útil de rellenos sanitarios.
- ❖ Destrucción de embalses de hidroeléctricas
- ❖ Potenciales reservorios de vectores como los zancudos causantes del dengue y la malaria entre otros.

- ❖ Los efectos económicos de la mala disposición de los envases PET, así como en otros residuos están asociados con:
- ❖ Reducción de visitantes a centros turísticos con fuentes de agua contaminadas y con ello, pérdida de ingresos por las actividades productivas y ventas de servicios en estos centros.
- ❖ Incrementos de los costos de mantenimiento de carreteras y centros turísticos.
- ❖ Incremento en los costos de manejo de botaderos y rellenos sanitarios.
- ❖ Incremento en los costos de producción hidroeléctrica.
- ❖ Pérdida de la salud, del bienestar social y económico de la población [31].

Hasta el momento, la información recabada no permite determinar la cantidad de envases de PET que se encuentran dispuestos inadecuadamente; sin embargo, es notoria su presencia en los cauces de corrientes superficiales y en el drenaje, provocando taponamiento del sistema y dificultades en los procesos de desazolve, lo que facilita inundaciones en la temporada de lluvias; además de generar "montañas" de envases en las orillas de los cauces de ríos. Los lotes baldíos representan también un fuerte foco de atracción para el desecho de diversos residuos, de entre los cuales destacan los envases de PET.

A pesar de que las características físicas y químicas aseguran que este material es inerte en el medio ambiente, el impacto visual que produce la inadecuada disposición de estos envases es alto y muy perceptible por la población [40].

### **3.8 Ley de residuos sólidos**

En México la disposición de residuos sólidos esta sustentada en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Secretaría del Medio Ambiente y LGEEPA ( Ley General de Equilibrio Ecológico para la Protección del Ambiente).

En lo que se refiere a la constitución, como la ley suprema de la unión que enmarca y limita a las legislaciones que de ella emana, se recalca el hecho de que en 1983 se introdujo en el artículo 115, la mención de la responsabilidad de los municipios de brindar los servicio de limpia, conservando una concepción ancestral que aborda la gestión de los residuos, principalmente desde un enfoque sanitarista, centrado en medidas de higiene para prevenir riesgos de salud, a lo que se hace referencia al introducir el término servicios de limpieza. Pero no es hasta finales de 1999 que se adiciono a esta la atribución de recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos, así como en los artículos 124 (los estados tendrán a su cargo la limpieza de sus entidades) y 73 (confiere a los estados facultades para la legislación propia para sus residuos).

A nivel nacional la ley de residuos sólidos se sustenta en los siguientes puntos: lixiviados, manejo, minimización, plan de manejo, plan de selección y tratamiento, pepena, procuraduría, recolección, selección o separación, reciclaje, rellenos, residuos de manejo especial, residuos urbanos, residuos orgánicos, residuos inorgánicos, residuos sólidos y reutilización.

En abril del 2003 en la Ciudad de México se estableció por parte de la asamblea legislativa del D.F. la ley de residuos sólidos, la cuál se sustenta en la clasificación de desechos orgánicos e inorgánicos, entrando en este caso los envases PET. Dicha ley hace referencia a la disposición de los residuos sólidos en sus artículos X, XI, XV, XVII y XVIII.

X- Los órganos políticos de cada demarcación política en las que se divide el D.F. tendrán la obligación de la recepción de los desechos sólidos generados en su entidad.

XI- La disposición final, se maneja como la acción de depositar o confirmar permanentemente residuos sólidos en sitios o instalaciones cuyas características prevean afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos.

XV- La gestión integral, es el conjunto articulado e interrelacionado de las acciones y normas operativas, financieras, de planeación, administración, social, educativas, de

monitoreo, supervisión y evaluación para el manejo de los residuos sólidos, desde su generación hasta su distribución final.

XVII- La ley general de equilibrio ecológico y de protección al ambiente, junto con la asamblea, determinada la clasificación de los residuos sólidos para la ciudad.

XVIII-Es la Ley Ambiental para el D.F. donde se sustenta la nueva ley de residuos sólidos para la Ciudad de México.

## **CAPITULO IV**

### **PROCESOS DE RECICLADO DE PET**

El PET, como la mayoría de los plásticos sintéticos no se degradada con el medio ambiente. Al contrario de la madera, el papel, las fibras naturales e incluso el metal y el vidrio; el PET no se oxida ni se descompone con el tiempo. Se han desarrollado algunos plásticos biodegradables, pero el PET se le sigue tratando de la manera convencional.

La eliminación del PET representa un problema para el medio ambiente, por lo cuál el método más práctico para resolver el problema es el reciclaje, que se utiliza en su principal producto, por ejemplo; en las botellas de bebidas gaseosas u otros productos de envase.

El PET, es obtenido del petróleo el cuál es no renovable; esta es la razón que el reciclado del PET es de suma importancia, y de los plásticos en general. Los envases de PET son 100% reciclables; además por ser ligeros, contribuyen a reducir la generación de residuos.

El reciclado del PET es la práctica más útil para reducir los desperdicios sólidos de las ciudades. Debido a que nivel internacional y nacional representa un alto generador de desechos [12,18].

#### **4.1 Definición de procesos de reciclado.**

El reciclado es el reproceso de los materiales, en este caso del PET, con el propósito de integrarlos nuevamente a un ciclo productivo como materia prima.

En general, es un proceso donde los materiales de desperdicios son reciclados y transformados en nuevos materiales que puedan ser utilizados o vendidos nuevamente como o materia prima [4,6].

#### **4.2 Historia del reciclado de PET**

En la década de los 70's, se inicio el proceso de reciclado de los plásticos, debido a que el precio de los plásticos se empezó a incrementar, y posteriormente al desabasto de materias primas; como consecuencia de la crisis de petróleo y el incremento de éste.

Debido a estas circunstancias se propicio al desarrollo de tecnologías de recuperación, las cuales atenderían a los principios de los 70's las necesidades de los consumidores para

solucionar los problemas de abasto. Para dar solución al problema de los desechos plásticos, se han desarrollado diversas investigaciones que incluyen métodos físicos y químicos. Los métodos físicos consisten en el sistema de lavado, separación, molienda, fusión y granulado.

Tomando en cuenta las ventajas de los métodos físicos, nace el reciclado de materias plásticas, que cobra una gran importancia en los años 80's, donde surgen mercados y aplicaciones como una opción de negocio.

En lo 90's surge la idea de desarrollar centros de acopio, en donde se recolectan sistemáticamente los diferentes materiales para facilitar su transformación superior. Sabemos que actualmente uno de los problemas que enfrenta el acopio de PET es el volumen que ocupa, por tal motivo es necesario que antes de depositarlo en los contenedores, se vacíen completamente, se aplaste la botella completamente y se separe del resto de la basura.

La escasez de materias primas (de la cual se hablo anteriormente), que presenta actualmente la industria del plástico fomenta la investigación y el desarrollo tecnológico del reciclado. [3, 31, 42,43]

El la figura 8 se observa el ciclo de vida de envases PET y ejemplifica la gran diversidad de usos que se le da al los productos obtenidos del reciclaje del PET en la actualidad.



Figura 8. Ciclo de vida del envase PET. [42]

## **4.3 Tipos de Reciclado**

El reciclaje ha recibido mucha atención, por lo cuál se han desarrollado varias técnicas de reciclado para este producto, como son el reciclaje primario, secundario, terciario y cuaternario.

### **1.3.1 Reciclado Primario**

Es la conversión de residuos plásticos hacia productos con características de desempeño equivalentes a los de su uso original, fabricados de plásticos vírgenes, através de métodos comunes de procesamiento. Se refiere principalmente al reciclaje de los residuos de producción y por lo tanto no es una tecnología de reciclaje de artículos de posconsumo. Históricamente no se ha considerado al reciclaje primario como parte de reciclaje de polímeros industriales porque los desechos de producción no llegan a los residuos sólidos municipales.

### **1.3.2 Reciclado Secundario**

La conversión de residuos plásticos a productos con especificaciones de desempeño menores a las del material original, a través de una o varias combinaciones de operaciones unitarias. Esta definición engloba a las actividades ordinarias conocidas como reciclaje.

### **1.3.3 Reciclado Terciario**

Es el reciclado que cuenta con tecnología de proceso, para producir sustancias químicas, combustibles a partir de residuos plásticos.

### **1.3.4 Reciclado Cuaternario**

Es el reciclado que cuenta con tecnología para recuperar energía a partir de residuos plásticos, a través de la incineración; se le considera más por su recuperación de recursos que una tecnología de reciclaje [42-43].

### **4.4 Reciclado Mecánico**

Consiste fundamentalmente en aplicar calor y presión a los objetos para darles nueva forma. De todos los tipos de plásticos, este proceso solo puede aplicarse al grupo de los termoplásticos, que funden al ser calentados por encima de la temperatura de fusión.

- 1.** Cuando el material llega a la central de reciclado pasa a una zona de lavado y secado para evitar que se mezclen impurezas.
- 2.** Una vez limpio se le somete a una trituración mediante máquinas de molienda, de forma que los trozos de material salen muy pequeños, en forma de bolitas o incluso a veces en forma de polvo.
- 3.** Este material triturado alimenta una máquina de extrusión que proporciona calor y presión para que la masa de plástico se funda y pueda utilizarse para extrusionar, que es un proceso continuo, en que la resina es fundida por la acción de temperatura y fricción, es forzada a pasar por un dado que el proporciona una forma definida, y enfriada finalmente para evitar deformaciones permanentes.

A continuación en la figura 9. Se muestran las principales etapas del reciclado mecánico de PET.

## Proceso de reciclaje mecánico del PET



Figura 9. Proceso de reciclaje mecánico de PET. [42]

### 4.4.1 Reciclaje físico (mecánico)

#### Tratamiento físico

Este tipo de tratamiento es el más utilizado en la actualidad para reciclar el PET. En México hay un gran número de empresas dedicadas a reciclar PET y que en su totalidad emplean el tratamiento físico para obtener PET como fibra.

Este tratamiento es sencillo y consiste principalmente en las siguientes etapas que se describen a continuación:

1. La selección de botellas del mismo color es la primera etapa del tratamiento.
2. Una vez seleccionadas las botellas son enviadas a la etapa de triturado y lavado de material, eliminando con enjuague las etiquetas y el papel adherido a la botella PET.
3. En una tercera etapa se separa el polietileno (PE) y polipropileno (PP), provenientes de etiquetas y tapas de PET. La separación se efectúa con un segundo lavado y por decantación.
4. El material proveniente del fondo del tanque de decantación es secado e inmediatamente enviado un excursor que calienta el material a una temperatura cercana a su punto de fusión haciéndolo pasar por la boquilla del mismo y posteriormente el filamento formado es enfriado y peletizado para su almacenamiento y transporte.

#### **4.4.2 Propiedades del PET reciclado físicamente**

Las propiedades del PET se modifican por la presencia de contaminantes en artículos por reciclar, ya que el embalaje de botellas de desecho de PET y recipientes aplastados pueden contener otros materiales tales como polietileno (PE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), etiquetas y papel que contiene adhesivos no compatibles con el poliéster y original que el PET en presencia de calor se degrada disminuyendo su viscosidad. Por lo tanto debe ser separado y limpiado de estos materiales contaminantes.

Por otra parte también las diferencias entre las propiedades del PET reciclado mecánicamente y el virgen se deben a los procesos térmicos que se dan al material reciclado, los cuales llevan a pesos moleculares menores, mayor cantidad de grupos de ácido carboxílico terminales, y mayor presencia al color y acetaldehído libre.

El margen del procesamiento para el PET reciclado es menor que el del PET virgen ya que el material reciclado tiene una temperatura menor de cristalización. Esto puede relacionarse

en presencia de material heterogéneo como partículas de polvo que favorecen la nucleación.

Debido a la mayor área superficial específica de las hojuelas permite absorber mayor cantidad de humedad, el efecto de la hidrólisis es más efectivo para el reciclado que para el material virgen. También sus propiedades mecánicas se modifican, con respecto al PET virgen, como se muestra en las tablas 10 y 11.

**Tabla 10. Comparación de las propiedades de PET virgen y reciclado. [38]**

<b>Propiedad</b>	<b>PET Virgen</b>	<b>PET Reciclado</b>
Modulo de Young (MPa)	1890	1630
Fuerza de tensión a la ruptura (MPa)	47	24
Elongación a la ruptura (%)	3.2	110
Fuerza de impacto	12	20

**Tabla 11. Hojuelas de PET reciclado. [38]**

<b>Parámetro</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Unidades</b>
% de Humedad	0.1-0.35	% W H <sub>2</sub> O
Densidad	1.3-1.5	g/ml
Viscosidad	.650	g/cms
Cloruro de polivinilo	200 máx.	Ppm
Porcentaje de impurezas	500-1000	Ppm
Fundido	Limpio	-
Apariencia	Trasparente	-
Punto de fusión	250	<sup>a</sup> C
Tipo de material	Refresco	-

Como vemos el reciclaje físico es económico pero abarca un mercado no muy grande todavía para su rehúso debido a algunas de sus propiedades son inferiores (químicas y mecánicas) con respecto a las del PET virgen.

#### **4.4.3 Desventajas del reciclado físico**

Existen un gran número de compañías a nivel mundial que han desarrollado procesos de manufactura. El material obtenido por este tratamiento no presenta la suficiente calidad para ser empleado en la industria alimenticia, sin embargo EREMA y WELLMAN han logrado mejoras a este proceso, al nivel que el producto ha sido aprobado por FDA para su utilización en la industria alimenticia.

#### **4.5 Reciclado químico**

Para el reciclado químico, se han desarrollado distintos procesos. Dos de ellos la metanólisis y la glicólisis, se han llevado a nivel industrial. El PET depolimeriza, se separan las moléculas que lo componen y estas se emplean para fabricarse otra vez PET. Dependiendo de su pureza, este material puede usarse, incluso para el envasado de alimentos.

Este tipo de proceso involucra una alteración en la estructura original del material y se basa en la descomposición del PET en moléculas de menor peso molecular. El tratamiento puede ser llevado a cabo por hidrólisis, metanólisis, glicólisis, aminólisis, pirolisis e incineración. Entre los tres primeros los productos obtenidos pueden ser nuevamente empleados en la elaboración del PET.

El proceso químico ofrece las siguientes ventajas:

- ❖ Muy competitivo económicamente. Para una planta de producción de 30,000 t/año se estima el costo de producción de unas 500 \$/t, debido a la utilización de aditivos de bajo costo y de bajo consumo de energía. No selección o lavado previo es necesario

- ❖ Acido Tereftalico y Etileneglicol vendibles directamente a la industria química.
- ❖ Alternativamente se puede producir un producto PHT (Polyhidroxilethilertephtalato) que puede ser utilizado directamente para la producción de botellas PET.
- ❖ Plantas existentes convencionales de reciclaje PET pueden ser adaptadas para el proceso químico.

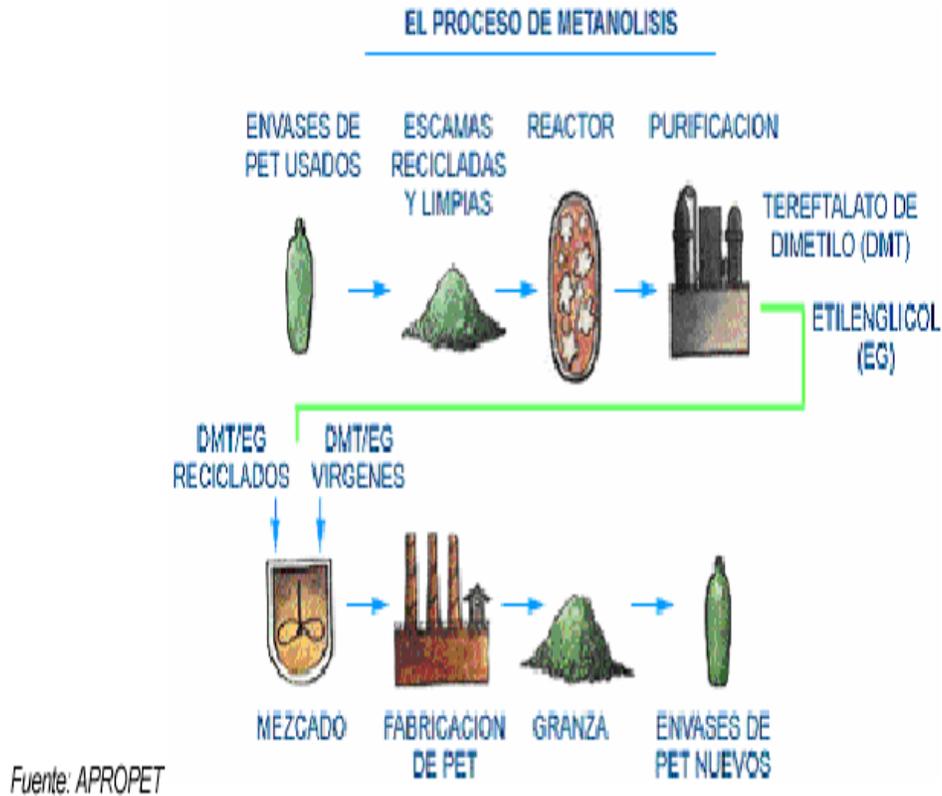
#### **4.5.1 Proceso de Metanólisis**

Consiste en separar los componentes químicos o monómeros que forman el plástico. Se trata, por tanto, de invertir las etapas que se siguieron para crearlo o “despolimerizar” las moléculas de plástico.

1. El reciclado químico por metanólisis del PET, se inicia con un lavado y una compresión de los objetos.
2. La materia prima llamada molienda se introduce en un reactor, que es el equipo que divide las moléculas de PET en moléculas de tereftalato de dimetilo y etilenglicol, dos compuestos químicos con los cuales se fabrica el PET.
3. Estos compuestos serán la materia prima para fabricar nuevos plásticos.

En la figura 10 se muestra el diagrama de proceso de reciclado químico de metanólisis.

## Proceso de reciclaje químico del PET

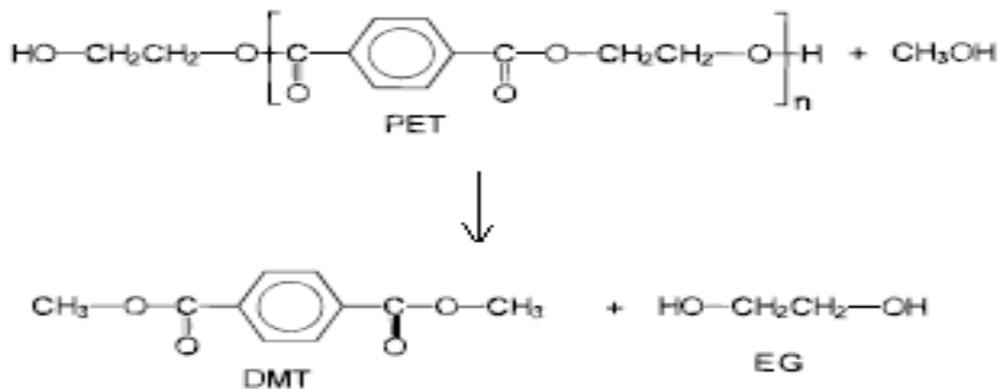


**Figura 10. Proceso de reciclaje químico de metanólisis de PET. [42]**

### 4.5.1.2 Reacción de metanólisis

Este proceso consiste en la degradación del PET con metanol a altas temperaturas y presiones. El resultado de la metanólisis es la formación estequiométrica de dimetiltereftalato (DMT) y etilenglicol (EG) que son las materias primas para la formación del polímero.

En la Figura 11 se muestra la reacción llevada a cabo para el proceso de la metanólisis.



**Figura 11. Reacción de Metanólisis en el reciclaje del PET.**

El proceso se realiza a temperaturas entre 160 y 300°C y presiones de hasta 7 MPa, en presencia de catalizadores de transesterificación, y usualmente se lleva a cabo en dos pasos: La metanólisis en sí, que produce DMT y EG, y la purificación llevada a cabo por cristalización o destilación. La destilación remueve las impurezas físicas y se obtiene como resultado un producto de alta pureza.

La metanólisis es aplicada usualmente a los desechos de PET en procesos que realizan el ciclo completo hasta volver al polímero. La alimentación típica de la metanólisis consiste en láminas usadas, desechos de plantas, desechos de fibras y botellas usadas.

La reacción de la metanólisis se lleva a cabo frecuentemente a presiones de 7 MPa y temperaturas de 180-280°C. Para 1 hora de reacción es usado como catalizador acetato de zinc, acetato de magnesio o acetato de cobalto. Siendo el más usado el acetato de zinc.

Luego de completar la reacción, el catalizador debe ser desactivado; de otra forma, en etapas posteriores se puede perder DMT por transesterificación con EG.

El DMT que se obtiene es precipitado de la mezcla post-reacción y luego es centrifugado, cristalizado y opcionalmente destilado.

En la metanólisis se utilizan los procesos batch o continuo. Los elementos principales de el proceso batch son el autoclave, el cristizador, la centrifugadora y un sistema para la fundición y destilación del DMT obtenido. El proceso continuo requiere de equipos mucho más complejos, ya que necesita un abastecimiento permanente de materias primas a un reactor presurizado [41].

#### **4.5.1.3. Características principales de la Metanólisis como un proceso para el reciclaje químico del PET.**

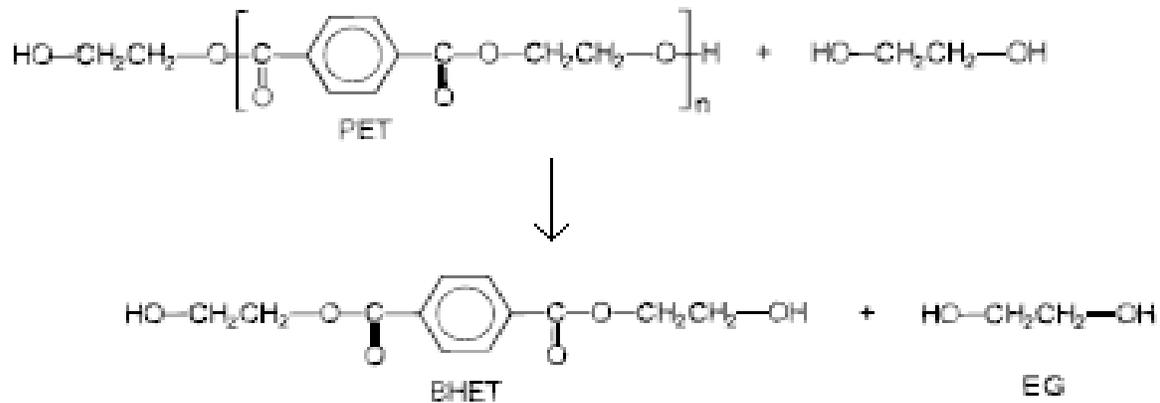
- Es un proceso sensible a la presencia de agua y causa problemas asociados al envenenamiento con el catalizador, formación de azeótropos, etc.
- El costo del DMT recuperado es usualmente mayor que el DMT virgen, pero existen nuevas tecnologías descubiertas por Eastman-Kodak y Dupont, que son más ventajosas económicamente que los procesos convencionales.

#### **4.5.2 Proceso de Glicólisis**

Es el segundo método más importante para el procesamiento químico del reciclado del PET. El resultado de una glicólisis exhaustiva son los productos BHET y EG.

##### **4.5.2.1 Reacción de Glicólisis**

El rango de temperaturas empleadas va de 180° a 250°C durante un periodo de 0.5 a 8 horas y como catalizador acetato de Zinc. Los productos de la depolimerización son el bis (hidroxietil) tereftalato y el etilen glicol (Paszun, 1997).



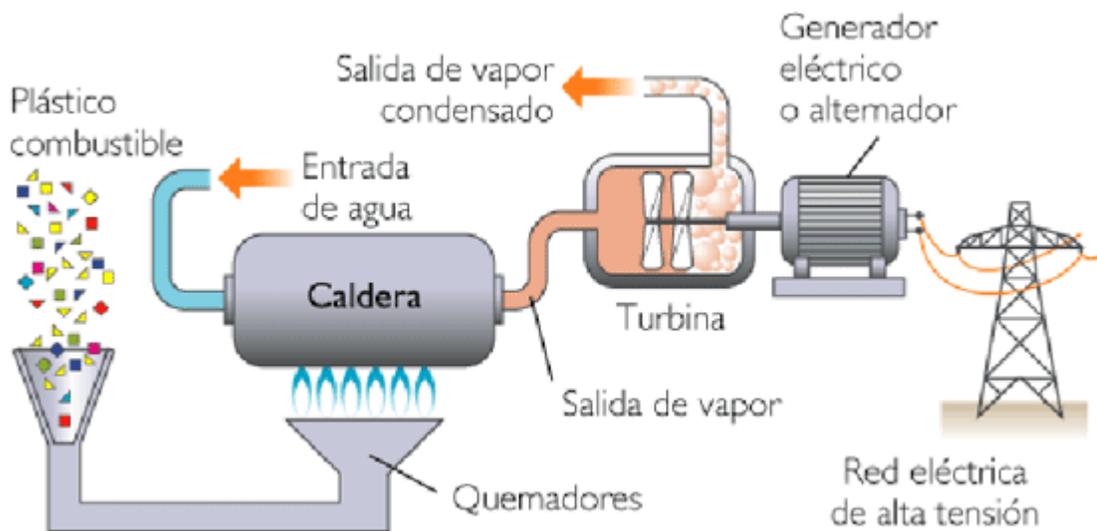
**Figura 12. Reacción de Glicólisis en el reciclaje del PET. [42]**

#### 4.6 Reciclado energético

En cuanto al uso del PET como combustible alternativo, los envases pueden emplearse para generar energía ya, que éste residuo tiene un poder calorífico de 6,3 Kcal/kg, y puede realizar una combustión eficiente. Esto es posible ya que durante su fabricación no se emplean aditivos ni modificadores, lo cual permite que las emisiones de la combustión no sean tóxicas, obteniéndose tan sólo bióxido de carbono y vapor de agua.

Muchos plásticos pueden arder y servir de combustible. El plástico usado se lleva a una incineradora para ser quemado, obteniéndose energía calorífica que puede utilizarse en los hogares o en la industria, o bien para obtener electricidad.

A modo de ejemplo: 1 kg de polipropileno aporta en su combustión casi tres veces más energía calorífica que 1 kg de madera de leña; 1 kg de PET aporta igual energía que 1 kg de carbón; o 1 kg de polietileno genera igual energía que 1 kg de gasóleo. Pero, al tratarse de un proceso de combustión, se genera CO<sub>2</sub> que es expulsado a la atmósfera y contribuye al efecto invernadero, así como otros compuestos gaseosos como el CO<sub>2</sub> que pueden resultar tóxicos. Por ello, este proceso debe ir acompañado de controles y medidas de seguridad que eviten estos efectos dañinos [37].



**Figura 13.** Proceso de reciclado energético de PET. [42]

#### 4.7 Usos y aplicaciones del PET reciclado

La industria incorpora a sus procesos de producción, el material de PET reciclado. Este material debe cumplir con algunas especificaciones que dependerán para el uso o para el producto que se pretende fabricar, pero en general, se debe contar con un producto de excelente calidad.

Se produce a partir del Ácido Tereftálico y Etilenglicol, por policondensación; existen dos tipos: grado textil y grado botella.

Para el grado botella se lo debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos.

### **4.7.1 CARACTERISTICAS**

Envases para gaseosas - Aceites - Agua mineral - Cosmética - Frascos varios (mayonesa, salsas, etc.) - Películas transparentes - Fibras textiles - Laminados de barrera (productos alimenticios) - Envases al vacío - Bolsas para horno - Bandejas para microondas - Cintas de video y audio - Geotextiles (pavimentación / caminos) - Películas radiográficas.

#### **Ventajas y Beneficios:**

Barrera a los gases

Transparente

Irrompible

Liviano

Impermeable

No tóxico

Inerte (al contenido)

### **4.7.2 USOS**

#### **FIBRA**

Alfombra

Ropa

Telas para decoración

(cortinados, ropa de cama, tapicería, etc)

#### **EMPACADO**

Bebidas (gaseosas, agua mineral, jugos, etc.)

Comidas

Perfumería y cosméticos

Productos para el hogar

Licores

Productos farmacéuticos

## PELÍCULA

RADIOGRAFÍAS, CINTAS DE VIDEO Y AUDIO.

En la tabla 12 se encuentra las principales características del PET utilizado en el empaçado.

**Tabla 12. Características del PET usado para empaçado. [44]**

<b>Características</b>	<b>Envase de alimentos</b>	<b>Envase de bebidas</b>	<b>Envase de productos personales, para la salud y para el hogar</b>
DURABLE, FUERTE	Si	Si	Si
RESISTENTE AL AGRIETAMIENTO	Si	Si	Si
ALTA RELACIÓN FUERZA/PESO	Si	Si	Si
VERSATILIDAD DE COLORES	Si	Si	Si
CRISTAL	Si	Si	Si
ÁMBAR, VERDE CLARO	Si	Si	Si
AMPLIA VARIEDAD DE COLORES	Si	Si	Si
ALTO BRILLO Y CLARIDAD	Si	Si	Si
NO IMPARTE GUSTO NI OLOR	Si	Si	Si
BARRERA A LOS GASES	Si	Si	Si
LLENABLE EN CALIENTE	Si	Si	Si
RESISTENCIA QUÍMICA	Si	Si	Si

El PET es el material de empaqueo de mayor reciclado. Varios millones de toneladas se reciclan en productos de valor agregado.

Los materiales de empaqueo de PET representan, aproximadamente, sólo el 0,3 % del total de los residuos sólidos urbanos. Los esfuerzos en todo el mundo siguen siendo para reducir la cantidad de envases de PET que se depositan en los rellenos sanitarios.

Aunque los envases de PET no se descomponen, ellos no contienen componentes nocivos que podrían lixiviar en las aguas subterráneas [38].

A continuación se muestra en la tabla 13 una comparación del reciclaje mecánico y químico en base a la calidad de operación y producción.

**Tabla 13. Comparación de reciclaje mecánico y químico. [38]**

	Reciclado mecánico	Reciclado químico	
		glicólisis	metanólisis
Calidad del desperdicio	Alta	Moderada	Amplia
Costo de operación	Bajo	Moderado	Alto
Calidad de producción	Moderada	Alta	"Virgen"
Mercado	Reducido	Muchos	Todos

Fuente: APROPET

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los principales procesos químicos de reciclado de PET, importantes en la búsqueda de una mejora en la vida de las sociedades actuales que esta determinada por una creciente industrialización, esto ha provocado que surjan problemas como la contaminación por desechos sólidos, esta situación a obligado al desarrollo de nuevos materiales par tratar de disminuirlos.

En este sentido, los plásticos han venido a revolucionar nuestros hábitos de consumo y en especial la del PET grado botella que ha venido a ocupar el lugar más importante dentro de los materiales de envases para bebidas y productos alimenticios y lo seguirá haciendo, ya que ofrece múltiples ventajas, técnicas, económicas y ambientales comparada con la de otros materiales tradicionales de envase como; el vidrio, el cartón, aluminio, etc. A los que ha desplazado durante los últimos años por el beneficio que resulto el uso del PET en cuanto a costos.

El reciclaje puede ser frecuentemente menos costoso que el método de administración de desperdicios.

El ahorro de recursos naturales es muy importante, ya que estos están desapareciendo, por lo cuál es necesario crear procesos que permitan descomponer los desechos y volverlos menos agresivos para el medio ambiente y si es posible volver a utilizarlos.

El hacer productos a partir de envases PET, genera menos contaminación en el aire y en el agua que el hacer productos vírgenes. Cuando los materiales reciclados se utilizan para la creación de nuevos productos, estos no van a tiraderos o incineradores.

Se puede establecer que los principales procesos químicos más utilizados en la industria del reciclado de PET son la glicólisis y la metanálisis, siendo el último el más utilizado a nivel nacional.

Debido a que la metanálisis es un proceso en el cuál, el producto terminado tiene mayor calidad que el de cualquier otro proceso químico de reciclado mencionado en esta investigación.

Personalmente considero que en su totalidad este trabajo cumple con los objetivos establecidos además satisface mi interés personalmente el tema, de igual manera resulta de gran interés para una continuación en la investigación del tema.

## APENDICE

Codificación internacional para los distintos plásticos.[42]

<b>Tipo de plástico:</b>	<b>Polietileno Tereftalato</b>	<b>Polietileno de alta densidad</b>	<b>Policloruro de vinilo</b>	<b>Polietileno de baja densidad</b>	<b>Polipropileno</b>	<b>Poliestireno</b>	<b>Otros</b>
<b>Acrónimo</b>	PET	PEAD/ PEHD	PVC	PEBD/ PELD	PP	PS	Otros
<b>Código</b>	1	2	3	4	5	6	7

## REFERENCIAS

- 1.- Robert -Stewart –Caseiro. “Química Orgánica”. Edi.Fondo Educativo Interamericano. EUA 1974.
2. - [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com) 5-septiembre-2009
3. - Mondragón J. “Manual de apuntes de Química Orgánica V para Ingenieros Químicos”. Netfirms. FES Cuautitlán 2003.
- 4.-[www.isri.org](http://www.isri.org) 6-septiembre-2009
- 5.- Zahoram Carrasco V. “Criterios de inyección de plásticos”.Tesis UNAM FES Cuautitlán 2004.
- 6- [www.plasticosmexicanos.com.mx](http://www.plasticosmexicanos.com.mx) 5-Septiembre-2009
- 7- Tlapalamatl F. “Depósitos electrolíticos sobre plásticos”. Tesis UNAM FES Cuautitlán 2005.
- 8.-Maya S. “Manual de apuntes de costos para Ingeniería de Alimentos”. Tesis UNAM FES Cuautitlán 1999.
- 9.-Nicolín A. “Reciclado de residuos sólidos plásticos” .Tesis UNAM FES Cuautitlán.
- 10.- [www.reciclamos.org](http://www.reciclamos.org) 5-Septiembre-2009
- 11.- Kent J. A. “Química Industrial”. Edit. CECOSA, México 1984.
- 12.- Procesos Industriales, Manual de Apoyo para IME. FES 2002.
- 13.- Richard A.Flinn. “Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones”. Edit. McGraw-Hill 3ª Edición. U.S.A.1990.
- 14.-Hernández R. “Reducir, Rehusar y Reciclar Polímeros Industriales en México”. Tesis UNAM Fac. de Química 1998.
- 15.- Flores A. Alonso. “Instalación y Arranque de una Planta de Soplado PET”.Tesis UNAM FES Cuautitlan 2002.
- 16.- [www.ecoce.mx](http://www.ecoce.mx) 16-Diciembre-2009
- 17.- Mortan Jones. “Procesamiento de Plásticos Inyección y Moldeo”. Edit.Limusa U.S.A. 1999.

- 18.- Morales R. Bárbara. “Estudio de Factibilidad Técnico Económico para Reciclado de PET”. Tesis UNAM Fac. de Química 2003.
- 19.- Cuevas S. “Optimización de Reciclaje Químico de la Hidrólisis de PET de Basura”. Tesis UNAM Fac. de Química 2003.
- 20.- Topete C. “Tecnologías de envasado utilizando resina de PET “. Curso de envase y embalaje de grasas y aceites . Asociación Americana de Soya,1999.
- 21.- [www.plastivida.com.mx](http://www.plastivida.com.mx) 15-Enero-2010
- 22.- Kuhne G. “El Plástico en la Industria.Tratado Práctico Envase y Empaque”. Edit. G. Gilli S.A. de C.V. 2º Edición. N. Y. 1991.
- 23.- Manual para la identificación de Plásticos, IMPI-Instituto Mexicano del Plástico.1998.
- 24.- Enciclopedia del Plástico.IMPI.Instituto Mexicano del Plástico.1998.
- 25.- Enciclopedia of Polymer and Ingeneering. 1<sup>st</sup> Volume. U.S.A.1990.
- 26.- Procesos del PET, Empaque Performance,U.S.A.Abril 1996.
- 27.- Spring Verlang. “Aditives for Plastics”. New York.1983.
- 28.- Plastics Technology Handbook. Chanda Monas and Roy Salil. 3º Edition. New York.1998.
- 29.- Stanley E. “Fundamentals of Enviroment Chemistry”. Edit. Lewis Publishes. Second Edition. U.S.A.2001.
- 30.- Tendencias en el Manejo de Desperdicios Sólidos. Tecnología del Plástico.Barcelona Septiembre 1997.
- 31.- Lund Herbert. “Manual de Reciclaje”. Edit. McGraw-Hill.Interamericana.1997.
- 32.- Castells E. “Reciclaje de Residuos Industriales”.Edit. Díaz de Santos.España.2002.
- 33.- [www.eia.com](http://www.eia.com) 15-Enero-2010
- 34.- Roa Luna Martha.”Reciclado de Plásticos de Gran Volumen Obtenidos a partir de los Desechos Urbanos”.Tesis UNAM Fac. De química.1996.
- 35.- [www.http://mailweb.udlap.mx](http://www.http://mailweb.udlap.mx) 25-enero-2010
- 36.- Beever. A. Plastics Chemical News. 15 de junio.pág 31.1991.
- 37.- Beever. A. Plastics Chemical News. Abril.pág 18-19.1993.
- 38.- [www.reciclajedepasticos.com](http://www.reciclajedepasticos.com) 16-Diciembre-2009

- 39.- [www.propiedadesmecanicasdelospolimeros.com](http://www.propiedadesmecanicasdelospolimeros.com) 20-Diciembre-2009
- 40.- [www.planambiental.org](http://www.planambiental.org) 11-Enero-2010
- 41.- [www.cuidaelambiente.com](http://www.cuidaelambiente.com) 10-Enero-2010
- 42.- [www.aprepet.org.mx/informacion/procesos/estadisticas](http://www.aprepet.org.mx/informacion/procesos/estadisticas) 23-Noviembre-2009
- 43.- Plásticos con etiqueta ecológica. Tecnología del plástico. Madrid. Enero. 2002
- 44.- [www.erres.org.uy-plasico.htm](http://www.erres.org.uy-plasico.htm) 15-Septiembre-2009
- 45.- Solke Susan. "Packing end the Environment". Edit Technomic Publishing. U.S.A. 1990.
- 46.- Chandler W.U. "Materials Recycling: The Vitue of Necessity". Worldwatch Institute. Washington. D.C. 1983.
- 47.- Entorno Químico, Información para el Desarrollo. CANACINTRA. Septiembre. 1997.
- 48.- [www./fultext/repind59/rap/rap.htm](http://www./fultext/repind59/rap/rap.htm)