

00521  
130



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**NORMATIVIDAD DEL RECICLAJE DE  
PLÁSTICOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA QUIMICA**

**P R E S E N T A :**

**ADRIANA PAOLA REYES CORDOBA**



**MEXICO, D. F. EXAMENES PROFESIONALES 2003  
FACULTAD DE QUIMICA**



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.

# PAGINACION

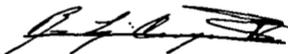
# DISCONTINUA

Journal of Management Studies is an international journal of research in the field of management. The journal is published quarterly and covers a wide range of topics in management, including strategy, organization, human resources, and financial management. The journal is peer-reviewed and is considered a leading journal in the field of management studies.

**Jurado asignado**

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Presidente</b>    | <b>Prof. Rosa Luz Comejo Rojas</b>     |
| <b>Vocal</b>         | <b>Prof. Irma Cruz Gavilan García</b>  |
| <b>Secretario</b>    | <b>Prof. Rodolfo Torres Barrera</b>    |
| <b>1er. Suplente</b> | <b>Prof. Katia Solórzano Maldonado</b> |
| <b>2o. Suplente</b>  | <b>Prof. Elena Ivanovna Klimova</b>    |

**Sitio donde se desarrollo el tema: Facultad de Química**



**Asesor M. en A. Rosa Luz Comejo Rojas**



**Sustentante Adriana Paola Reyes Córdoba**

## DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

A Dios,

por ser mi escudo, mi refugio, mi fortaleza, mi guía, por amarme a pesar de todo, por darme la fuerza para luchar contra todo y sobre todo por haber enviado a Jesús a darnos vida eterna en su nombre,

por haberme dado todo lo que tengo:

A mis padres: Marco Antonio Reyes Larrauri, el hombre más sabio y con más fe y Josefina Córdoba Terán, la mujer más admirable que he conocido.

A mis hermanos, que a pesar de todo han sido un gran apoyo y me han ayudado a crecer

Gabriela, "the wind beneath my wings".

Marco Antonio, gracias por todo tu apoyo y por tus ganas de que yo salga adelante.

Marco Tulio, eres el mejor ejemplo de que cuando uno quiere salir adelante no hay nada que lo detenga.

Mónica, gracias por todo.

A mis sobrinos Raquel y Tobías.

A la familia Córdoba Terán, en especial a Lola y Concha y a la familia Reyes Larrauri, en especial a mi tía Griselda y a mis primos Alejandro y Omar y a Margarita Mansilla por todo el apoyo que nos han dado.

A la maestra Rosa Luz Cornejo por ayudarme a realizar este trabajo para por fin titularme y sobre todo por las pláticas maternas que han sido de mucha ayuda.

A Arturo, por apoyarme y ayudarme a superar muchas cosas que estaban mal "أحبك جيد".

A mis amigas, por los momentos que han compartido conmigo, por el apoyo que me han dado y por lo divertidas que son, todas ustedes han sido una gran bendición en mi vida:

Ethel, Anita, Vasthi, Hadasa, Mariana, Pily, Wendy, Elisa, Toña, Janina, Linda, las niñas Merc, Itzelita, Chantal, Rosalba, Elisa Gallo, y toda la tropa del equipo de futbol: Gisela, Monch, Pato, Paty, Alejandra, Nadia, Sol y Toy.

A mis amigos, que también me apoyaron, me ayudaron y me hicieron sonreír:

Samuel, José Manuel, Víctor Sayayo (gracias por tu paciencia para explicarnos a todos), Juan, Raúl, Gadiel, Alejandro Gallo, Set, Esteban, Raúl E., Fly, Davo y muy en especial a Gerardo

Al Pastor Nyenhuis, por su dedicación para estudiar y exponer la Biblia de manera clara y entendible y al Pastor Marco Escalante, por haberme ayudado en etapas difíciles. A toda la gente de Berith que cree en mí y que me ha apoyado durante mucho tiempo.

A mis maestros, porque gracias a ellos estoy aquí, en especial al Viejo y a Nicole, y al QFB Garza que sin su ayuda jamás hubiera pasado de tercer semestre.

Al laboratorio de Ambiental, sobre todo a la Dra. Durán por su apoyo en la realización de mi servicio social.

A la gloriosa Facultad de Química y a nuestra Universidad, a la que espero poder apoyar para que siga siendo la Máxima Casa de Estudios.

A nuestro país, al que gracias a Dios puedo pertenecer y apoyar, y del que puedo decir con argumentos que es el país más hermoso y lleno de riqueza que he conocido.

A Don Alfonso Córdoba y a Doña Felisa Flores (q.e.p.d.) con quienes me hubiera gustado compartir este logro.

*Tuya es, oh Dios, la magnificencia y el poder, la gloria, la victoria y el honor; porque todas las cosas que están en los cielos y en la tierra son tuyas. Tuyo, oh Dios, es el reino, y tū eres excelso sobre todos. Las riquezas y la gloria proceden de ti, y tū dominas sobre todo; en tu mano está la fuerza y el poder, y en tu mano el hacer grande y el dar poder a todos. Ahora pues, Dios nuestro, nosotros alabamos y loamos tu glorioso nombre. Porque ¿quién soy yo y quién es mi pueblo, para ofrecer voluntariamente cosas semejantes? Pues todo es tuyo, y de lo recibido de tu mano te damos.*

1º Crónicas 29:11-15



---

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN                                      | 1  |
| CAPÍTULO I Antecedentes                           | 4  |
| CAPÍTULO II Polímeros                             | 23 |
| Tipos de polímero                                 | 23 |
| Polimerización por radicales                      | 25 |
| Polimerización iónica                             | 26 |
| Polimerización por apertura de anillo             | 29 |
| Plásticos   | 32 |
| Generalidades sobre los plásticos                 | 33 |
| CAPÍTULO III PET                                  | 40 |
| Historia del PET                                  | 41 |
| Clasificación de acuerdo al uso                   | 42 |
| PET grado fibra                                   | 43 |
| PET grado película y lámina                       | 43 |
| PET grado botella                                 | 44 |
| PET grado ingeniería                              | 44 |
| Producción de PET                                 | 45 |
| Producción de PET a partir de Dimetil tereftalato | 45 |
| Transesterificación                               | 45 |
| Policondensación                                  | 46 |
| Producción de PET a partir de ácido tereftálico   | 47 |
| Métodos de moldeo                                 | 49 |
| Mercado   | 52 |
| CAPÍTULO IV Polietileno                           | 57 |
| Polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE)         | 60 |

|  |           |
|--|-----------|
| Polietileno de baja densidad (PEBD, LDPE)        | 61        |
| Características de los diferentes tipos de PE    | 63        |
| Propiedades del Polietileno                      | 64        |
| Fabricación                                      | 66        |
| <b>CAPÍTULO V Reciclaje de plásticos</b>         | <b>70</b> |
| Tipos de reciclaje                               | 72        |
| Reciclaje primario                               | 72        |
| Reciclaje secundario                             | 75        |
| Reciclaje terciario                              | 75        |
| Reciclaje cuaternario                            | 76        |
| Análisis del ciclo de vida                       | 77        |
| Tecnología para el reciclaje de resinas          | 80        |
| Clasificación de residuos plásticos              | 81        |
| Fuentes de residuos sólidos                      | 83        |
| Variables determinantes en el reciclado          | 84        |
| Las cuatro R's                                   | 85        |
| <b>CAPÍTULO VI Reciclaje de PET</b>              | <b>88</b> |
| Barreras para el reciclaje de PET                | 89        |
| Problemas de contaminación                       | 90        |
| Purificación por disolución y precipitación      | 93        |
| Reciclaje físico                                 | 93        |
| Propiedades del PET reciclado                    | 94        |
| Aplicaciones para el PET reciclado mecánicamente | 95        |
| Aplicaciones en fibras y alimentos               | 96        |
| Reciclaje químico (quimólisis)                   | 98        |
| Glicólisis                                       | 102       |



|   |            |
|---|------------|
| Metanólisis   | 103        |
| Hidrólisis  | 105        |
| Procesos híbridos (glicólisis-hidrólisis)           | 107        |
| <b>CAPÍTULO VII Reciclaje de Polietileno</b>        | <b>113</b> |
| Características del PEAD reciclado                  | 114        |
| Aplicaciones para el PEAD reciclado                 | 115        |
| Contaminación más frecuente en el PEAD              | 118        |
| <b>CAPÍTULO VIII Normas</b>                         | <b>124</b> |
| Normas mexicanas en materia de plásticos            | 126        |
| Legislación mexicana en materia de reciclaje        | 127        |
| Acciones internacionales para fomentar el reciclaje | 133        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                                 | <b>136</b> |
| <b>GLOSARIO</b>                                     | <b>139</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                 | <b>142</b> |
| <b>ANEXO I</b>                                      | <b>145</b> |
| <b>ANEXO II</b>                                     | <b>148</b> |
| <b>ANEXO III</b>                                    | <b>153</b> |
| <b>ANEXO IV</b>                                     | <b>156</b> |



---

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los plásticos han tenido que enfrentar uno de los mayores retos ya que lo que antes se consideraban ventajas como su resistencia a la degradación y economía con respecto a otros materiales, ahora se cuestiona debido al impacto ambiental. El reciclaje presenta como beneficios el mejoramiento ecológico y la creación de nuevas industrias lo cual da como resultado una reducción en la contaminación y la creación de nuevas fuentes de empleo y contribución a la economía del país.

El presente trabajo tiene como finalidad revisar las normas que reglamentan el reciclaje de los plásticos de mayor uso en la industria. El trabajo hace énfasis en dos tipos de polímeros que representan un porcentaje muy importante del plástico reciclado obtenido de residuos sólidos, estos plásticos son el polietilentereftalato (PET) y el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD).

En la primera parte del trabajo se exponen las razones por las cuales es importante revisar las acciones que se han tomado con respecto al reciclaje de plásticos en México, tomando en cuenta las acciones que otros países han realizado con respecto a este tipo de desechos que aún después de ser utilizados pueden servir de materia prima para otras aplicaciones.

Enseguida se da a conocer los aspectos más importantes en materia de polímeros y plásticos como su formación, los distintos tipos de procesos que se utilizan en la industria, los usos que se pueden dar a estos materiales y las



---

distintas clasificaciones que existen. Posteriormente se habla más a detalle sobre los dos tipos de plástico que son objeto del estudio (PET y PE).

Después se habla sobre los distintos métodos de reciclaje a los que puede someterse un material. Se estudian los métodos de reciclaje que pueden utilizarse para tratar los materiales antes citados, los procesos, las especificaciones del material que será reciclado, las propiedades del material una vez sometido al proceso y las aplicaciones industriales y comerciales que pueden dársele.

Posteriormente se examinan las normas que reglamentan el reciclaje en nuestro país y se comparan con las normas existentes en otros países en donde el reciclaje de materiales plásticos recibe mayor atención. Finalmente se llega a una conclusión haciendo énfasis en la necesidad de mejorar las normas que reglamentan el reciclaje de los materiales plásticos en México para mejorar la calidad ambiental.



---

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES



---

## ANTECEDENTES

En la década de los 90 hubo una revolución en cuanto al manejo de residuos sólidos en todo el mundo. Los gobiernos federales y locales aceleraron sus esfuerzos para reciclar los residuos sólidos municipales, esto ocurrió primeramente en Europa, después en Estados Unidos, posteriormente en Asia y en América Latina<sup>1</sup>.

Esta revolución surgió de dos preocupaciones principales relacionadas entre sí. La primera fue la preocupación creciente de que los sitios de disposición de residuos - rellenos sanitarios e incineradores - representaban problemas ambientales potenciales debido a sus emisiones a la atmósfera, la infiltración al suelo de lixiviados conteniendo subproductos de la degradación de los residuos y otros. La segunda fue la preocupación también creciente acerca del desperdicio de recursos. Los grupos ecologistas comenzaron a argumentar que los patrones actuales de consumo eran insostenibles y que, sin un reciclaje substancial, simplemente los recursos serían insuficientes<sup>2</sup> para mantener los patrones prevalecientes de producción y consumo.

En países como Estados Unidos, tradicionalmente los residuos eran recolectados y posteriormente se depositaban en los sitios de disposición final, pero durante la última década se introdujo el manejo integral, que incluye programas de reciclaje, composteo e incineración, y disposición final. Se debe tomar en cuenta el hecho de que la transición de la simple recolección y

---

<sup>1</sup> <http://www.sustenta.org.mx>

<sup>2</sup> Idem



---

disposición de los residuos al reciclaje y la composta implicó un incremento de costos principalmente para los gobiernos de los países que implementaron estos programas.

Hay varios criterios importantes en la evaluación de los diferentes programas que existen como opciones para disminuir, evitar o eliminar la problemática de la disposición de los residuos.

Primero está el aspecto de los costos, esto no quiere decir solamente el valor económico, sino también el impacto sobre la innovación donde a menudo se ignora el costo de introducir determinados tipos de programas de responsabilidad del productor. En estos programas los fabricantes deben pagar el costo por el manejo de los residuos, como ejemplo se tiene el costo de nuevos tipos de camiones de recolección o camiones especializados en transportar los residuos reciclables para después reprocesarlos. Algunos de estos equipos han generado una reducción en los costos del reciclaje como es el caso de países como Estados Unidos en donde la reducción ha llegado a ser hasta del 20%<sup>3</sup>, mientras que en otros países los costos siguen aumentando.

Por otra parte, el impacto de programas nuevos es crítico en países en vías de desarrollo (por ejemplo los pertenecientes a América Latina), donde el manejo de los residuos se efectúa mediante una combinación de instituciones formales e informales. Por ejemplo, los programas nuevos a nivel federal pueden afectar organizaciones informales locales que recolectan y venden materiales secundarios (reciclables). Otro tipo de costos que también deben ser considerados es la implementación de normatividades y reglamentos para

---

<sup>3</sup> <http://www.sustenta.org.mx>



---

asegurar que los programas de reciclaje se lleven a cabo tal y como fueron planeados.

En segundo lugar está el grado en que los programas propuestos se integran con las instituciones locales existentes, este criterio es de gran importancia en los países en desarrollo. En tercer lugar está el impacto que pueden tener los programas sobre la competencia, tanto en el sector de servicios de manejo de residuos como en los fabricantes de productos. Por último está el impacto que tienen los programas sobre la protección al ambiente.

Se debe considerar el impacto de los programas implementados sobre la protección al ambiente, la tarea final es tratar de reducir no únicamente las emisiones a la atmósfera, agua y suelo, sino también reducir tanto la cantidad de materiales que son utilizados para elaborar un producto, como la cantidad de energía utilizada por unidad de producción.

El reciclaje puede favorecer la conservación de recursos, pero solamente es un medio para alcanzar este fin, no es un fin en sí mismo; un "manejo ambiental global" involucra la reducción de todos los aspectos ambientales negativos durante el ciclo de vida del producto. En algunas ocasiones el reciclaje efectivamente representa un beneficio ambiental neto; sin embargo existen otros casos en donde las opciones tales como la reducción en la fuente, es decir, en la cantidad de materiales y energía utilizados por unidad de producto generado, proporcionan un beneficio ambiental mayor que el reciclaje. Existen tres criterios en particular que deben tomarse en cuenta antes de decidirse por el reciclaje:



- Es necesario considerar la facilidad con la que un producto puede separarse del conjunto de los residuos sólidos.
- Debe buscarse que el material que se va a reciclar esté disponible en grandes cantidades con una calidad relativamente uniforme en los residuos sólidos.
- Debe considerarse si el uso de materiales post consumo ayuda en la reducción de los costos de manufactura. Por ejemplo, en el caso del uso de aluminio reciclado para fabricar nueva laminación de aluminio para latas consume 95%<sup>4</sup> menos energía que la que se requeriría para fabricar dicha laminación a partir de la fusión de bauxita.

Los metales tienen un alto potencial de reciclaje y en el mercado han sido reciclados durante mucho tiempo sin acción del gobierno, pero existen otros materiales que no son reciclados en altos porcentajes (por ejemplo, los contenedores y empaques plásticos que alcanzan menos del 10%<sup>5</sup> en países como México y Estados Unidos). Obviamente, la razón obedece a la dificultad de seleccionar el plástico (con algunas excepciones), por lo que a menudo no está disponible en cantidad suficiente y con calidad uniforme (Tabla 1).

Otra razón por la cual el porcentaje de reciclado de los plásticos es reducido se debe a la idea generalizada de que el reciclaje en realidad no representa una ventaja. El plástico es un material muy eficiente al inicio de su fabricación; se

<sup>4</sup> Idem  
<sup>5</sup> Idem



---

requiere muy poca materia prima y energía para obtener productos con los atributos deseados. Después de ser usado puede ser quemado para generar energía, pero se piensa que su reciclaje no representa una gran ventaja desde el punto de vista costo-beneficio ya que muchas veces se desconocen los procesos. Como ejemplo de esta situación se observa a partir de las figuras 1 y 2 que se puede hacer una comparación entre los costos del PEAD natural y mixto (compuesto de PEAD natural y reciclado). El precio del material natural es prácticamente el mismo, con la ventaja de que éste es de mayor calidad.

Las comunidades locales de países desarrollados gastan entre el 30% y el 50% de su presupuesto en el manejo de residuos sólidos municipales<sup>6</sup>, pero en países en vías de desarrollo el manejo de residuos se ha vuelto un problema más complicado. En muchos países en América Latina existen segmentos de población que todavía no tienen acceso a servicios de recolección confiables; esto significa que el primer reto que debe resolverse es la implantación de esquemas de recolección de residuos, antes de pensar en programas más sofisticados.

---

<sup>6</sup> <http://www.sustenta.org.mx>



---

---

| Tipo de Material                           | % Reciclado |
|--|-------------|
| Acero                                      | 68.5        |
| Titanio                                    | 49.0        |
| Aluminio                                   | 40.0        |
| Hierro y acero                             | 40.0        |
| Papel y cartón                             | 40.0        |
| Cobre                                      | 38.6        |
| Níquel                                     | 35.6        |
| Magnesio                                   | 32.0        |
| Residuos de jardín                         | 30.3        |
| Hojalata                                   | 27.0        |
| Vidrio                                     | 24.5        |
| Zinc                                       | 24.2        |
| Cromo                                      | 19.8        |
| Llantas                                    | 17.5        |
| Materiales de madera (incluyendo empaques) | 9.6         |
| Plomo                                      | 61.5        |
| Empaques plásticos                         | 9.7         |

---

Tabla 1. Porcentajes de reciclado por tipo de material en Estados Unidos<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Idem

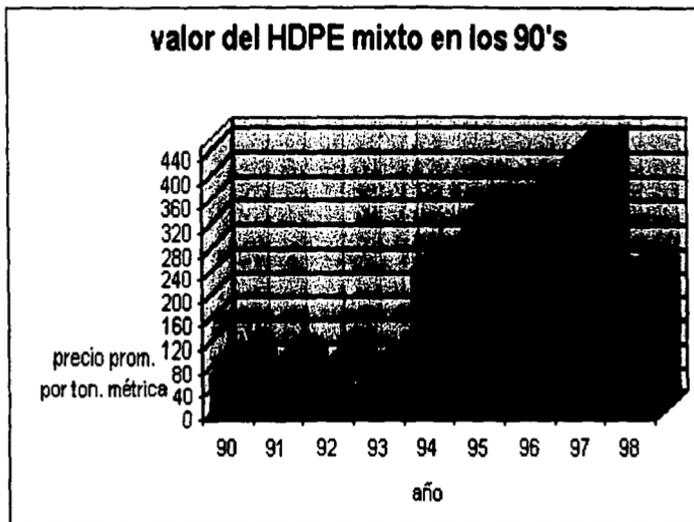


Figura 1. Costo en USD del PEAD\* mixto (mezcla de PEAD natural y reciclado) en Estados Unidos<sup>8</sup>

<sup>8</sup> <http://www.clubresiduos.org/WB84.pdf>

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

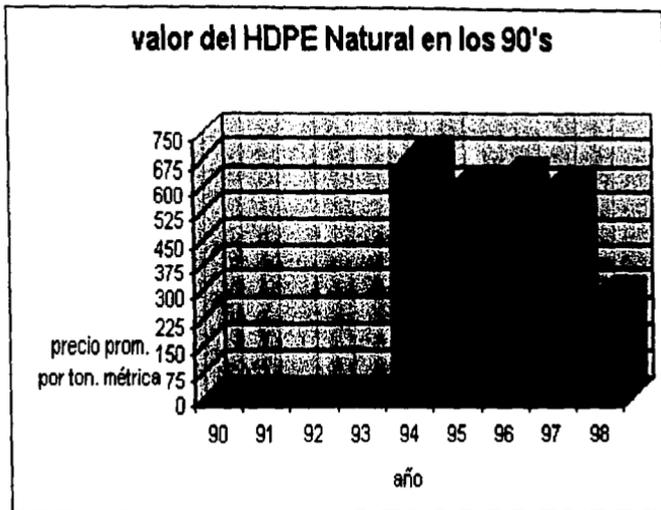


Figura 2. Valor en USD de PEAD natural en Estados Unidos<sup>9</sup>

\*Nota: HDPE = PEAD

<sup>9</sup> Idem

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

Finalmente, hablando sobre el manejo de residuos existen retos básicos en cuanto al nivel de seguridad con el que deben manejarse por ejemplo, los rellenos sanitarios que están en lugares geográficamente inadecuados son un problema muy común en países en vías de desarrollo.

Es necesario considerar el incremento en costos que implica la introducción de programas de manejo de residuos como el reciclaje. En los Estados Unidos, por ejemplo, se ha estimado que este incremento ha sido de entre el 10% y el 20%. En Europa, la legislación que demanda la separación de grandes cantidades de residuos de empaque a menudo ha resultado en un incremento en los costos de manejo de residuos.

Históricamente, los programas de manejo de recursos han sido financiados de tres maneras:

- A partir de los impuestos sobre la propiedad, por ejemplo en Estados Unidos la principal fuente de recaudación para el manejo de los residuos es el impuesto predial,
- A través de “cargos finales” al usuario, es decir a las casas, departamentos y establecimientos comerciales individuales. Bajo este esquema, cada hogar debe realizar un pago para que se recolecte, se recicle o se haga composta con sus residuos,



- A través de “cargos adelantados o iniciales” a los productos. En este esquema el cargo es pagado inicialmente a través del propio producto. Para cada producto se determina cuál es el costo de su reciclaje y con base en ello se establece un cargo que debe ser pagado en el momento de la compra del producto.

Tomando en cuenta el último punto, muchos países europeos crearon programas de “retorno” de productos, actualmente conocidos más formalmente como programas de Responsabilidad Extendida del Fabricante (EPR por sus siglas en inglés). El aplicar este tipo de programas se basa en la idea de que “el que contamina paga”. Sin embargo, este principio no indica 1) qué se entiende por contaminación 2) quién es el que genera la contaminación, o 3) cuál es el arreglo institucional que logra de mejor manera la eliminación de los “gastos externos”.

Cuando un fabricante elabora un producto, indudablemente debe ser responsable de toda la contaminación que se genera durante su proceso de manufactura y del gasto de recursos naturales utilizados para la obtención de sus productos, pero una vez que ese producto cambia de manos también ocurre un cambio de responsabilidad.

Los empaques, por supuesto, constituyen materiales contaminantes si se disponen en la vía pública o de manera inadecuada, al igual que cualquier tipo de residuo. Sin embargo estos son problemas específicos relacionados con el comportamiento de los usuarios de los productos, y no necesariamente problemas inherentes a los empaques.



---

Los países en vías de desarrollo enfrentan retos particulares relacionados con la introducción de programas EPR por varias razones. Primero, la infraestructura existente de recolección informal de residuos puede ya estar proporcionando un desvío de residuos sólidos para su reciclaje, controlado por las fuerzas del mercado, y estas actividades pueden verse afectadas negativamente por programas EPR. Este resultado posiblemente podría superarse asociando el sistema informal al programa EPR, sin embargo, su realización es una utopía.

En segundo lugar existe el problema de que los contenedores destinados para la separación de basura son utilizados de manera incorrecta, este problema se presenta de manera más acentuada en países en desarrollo, donde los servicios regulares de recolección de residuos pueden ser menos confiables y menos accesibles de manera sistemática para todos los ciudadanos.

Existen seis acuerdos que pueden ayudar o facilitar el manejo de residuos sólidos:

1. La implementación de programas de devolución voluntaria de residuos post consumo, enfocados principalmente a residuos peligrosos, que pueden también implementarse para residuos en general. Por ejemplo, en Estados Unidos existe una Asociación de Baterías Recargables que ha reunido a todos los fabricantes para que impulsen la devolución de estos productos y eviten su disposición inadecuada



2. La alianza de empresas para trabajar de manera conjunta en la investigación de nuevas formas de reciclaje o conservación de recursos.
3. El desarrollo e implementación de normas voluntarias, derivadas del trabajo conjunto de la industria y el sector público, lo cual llevaría a la creación de una cultura social.
4. La colaboración entre fabricantes y proveedores, en donde los fabricantes trabajan muy de cerca con los proveedores de sus materias primas para establecer normas en cuanto al contenido de lo que es reciclable, la reducción de sustancias tóxicas, etc. Un ejemplo de esto se presenta en Brasil, donde la asociación industrial CEMPRE ha estado trabajando para desarrollar este tipo de colaboración fabricante – proveedor.
5. La existencia de programas conjuntos de reciclaje y de manufactura. En Estados Unidos los fabricantes de máquinas domésticas, como lavadoras, secadoras y refrigeradores, están trabajando de maneja conjunta en programas de refabricación. Estos programas procuran que el consumidor una vez que terminó la vida útil de su aparato, la devuelva al fabricante quien, en vez de desecharla, la utilizará para fabricar un aparato nuevo.
6. La existencia de programas de pago por monto de residuos (waste-pricing programs), que comprenden los sistemas de cargos variables por monto de residuos generados.



Las autoridades mexicanas trabajan en la elaboración de normas y regulaciones (ver Anexos I y III) que prevengan la contaminación como consecuencia de un manejo inadecuado de los residuos post-consumo. En el desarrollo de esta tarea se debe tener presente que la generación de residuos significa un alto costo para la sociedad, en la medida que se desechan materiales cuya producción constituye una presión sobre los recursos naturales, un gasto de energía y posiblemente un consumo elevado de agua, mientras que su disposición final en tiraderos de basura a cielo abierto, en rellenos sanitarios o en confinamientos, contamina el ambiente y compromete el uso del suelo para otros fines que podrían resultar productivos.

Como justificación de esta acción se debe tomar en cuenta que muchos materiales desechados, sean peligrosos o no, tienen todavía un valor aprovechable, a través de su reúso, reciclado o regeneración, o bien de su empleo como combustibles alternos; lo cual significa la creación de fuentes de ingresos y de empleos, además de su revalorización.

Con base en el principio del que contamina paga, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), establece que quien contamine los suelos es responsable de su restauración. En la actualidad existen varias normas mexicanas que reglamentan la disposición de residuos peligrosos, sin embargo, para los residuos sólidos municipales o industriales no peligrosos no se ha logrado completar un esquema equivalente a la fecha, lo cual en gran medida se debe a que la legislación establece que es obligación de los gobiernos municipales proporcionar a la población servicios de limpia.



---

La LGEEPA establece como un enfoque preventivo de la contaminación del suelo, la necesidad de evitar la autorización del confinamiento de residuos reciclables (Art. 142), siempre y cuando esto sea económica y técnicamente factible. Se debe también tomar en cuenta que no siempre la generación de materiales secundarios a partir del reciclado de residuos es la opción más conveniente.

Tomando en cuenta la tendencia internacional y las nuevas disposiciones de la LGEEPA que desalientan el confinamiento de residuos y se orientan al fomento del reciclado o del tratamiento térmico de los residuos con recuperación de energía, es de vital importancia definir las políticas que controlen el reciclaje y el tratamiento de residuos de manera que sean adecuadas desde el punto de vista ambiental. Es importante mencionar que en México todavía no se cuenta con una cultura de reciclaje de residuos plásticos ni existe la infraestructura necesaria para fomentarlo de manera que por el momento los índices de reciclaje son poco significativos como se muestra en la figura 3.

Es conveniente tomar en cuenta factores como el análisis comparativo de ciclo de vida aplicado a la evaluación de los impactos ambientales potenciales y a los consumos de agua y energía, para generar tanto materiales primarios como secundarios, para decidir si el reciclaje representa una opción más recomendable que la producción de los materiales primarios.

### PORCENTAJES DE RECICLAJE POR TIPO DE PLÁSTICO EN MÉXICO

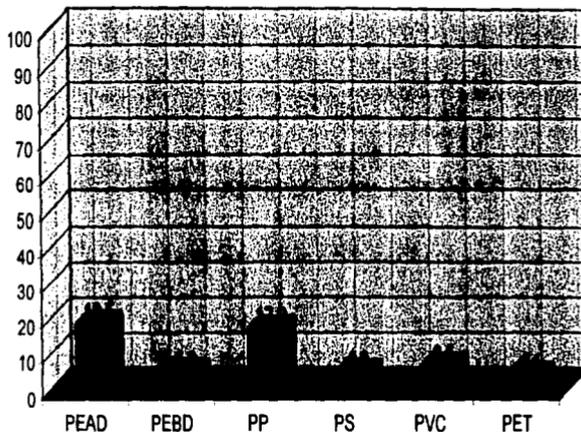


Figura 3. Porcentaje de reciclaje por tipo de plástico en México<sup>10</sup>

<sup>10</sup> ANIQ, estudio de mercado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

En lo que se refiere al tratamiento de los residuos sólidos, en otros países la oxidación térmica mediante incineración suele ser la práctica más frecuente de manejo de los residuos después del depósito en relleno sanitario, con o sin recuperación de energía. En México, esta alternativa no ha alcanzado un desarrollo significativo, ya que los incineradores de residuos sólidos con los que se cuenta son por lo general muy antiguos y destinados al manejo de residuos biológicos en hospitales, instituciones universitarias o bien a la destrucción de medicamentos o productos químicos caducos en algunas empresas.

Lo anterior lleva a considerar la necesidad de que todas las partes implicadas definan cuánto están dispuestas a pagar por disponer de sus residuos de una forma eficaz, económica y ambientalmente correcta. De acuerdo a esto se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- Corresponde al estado y a la sociedad prevenir la contaminación del suelo, aire y agua
- Los residuos sólidos municipales deben ser controlados ya que constituyen la principal fuente de contaminación del suelo y mantos freáticos
- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos municipales e industriales, incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.

No es posible, por ejemplo, establecer un programa eficiente de reciclado ni crear las redes comerciales y de servicios en la materia, si no se conoce:



- Qué residuos reciclables se generan en el país
- En qué volumen se generan
- Quién los genera
- En dónde
- Con qué frecuencia
- Con qué calidad
- Cuál es la infraestructura de transporte con la que se cuenta
- Cuál es la infraestructura para el acopio que se tiene
- Cuál es la infraestructura de reciclado de la que se dispone
- Qué tan distantes de los generadores se encuentran las empresas recicladoras
- Cuál es el costo de los materiales reciclados
- Cuál es la demanda de materiales reciclados
- Cuáles son las barreras que se oponen al reciclado
- Cuáles son las oportunidades que se abren al reciclado



---

Para poder implementar una política que regule el manejo de residuos sólidos no peligrosos se puede tomar como ejemplo la política nacional mexicana de residuos peligrosos. Esta tiene como prioridad, la reducción de la generación y peligrosidad en la fuente, en particular mediante la adopción de procesos productivos más limpios, los cuales se pueden dividir en tres tipos: la minimización de residuos en la fuente de producción, cambios en insumos y cambio del proceso o de la producción.

La segunda prioridad es el reúso, reciclado y recuperación, vista como una oportunidad para integrar cadenas productivas en donde los generadores se responsabilicen del costo de un manejo conveniente, así como de generar nuevas ramas de actividad económica y oportunidades de empleo.

El tratamiento constituye la tercera opción y tiene como propósito destruirlos o reducir su volumen y peligrosidad. El confinamiento es considerado como la última alternativa y sólo para aquellos residuos que no puedan ser manejados de otra manera.



---

# CAPÍTULO II

# POLÍMEROS



---

---

## POLÍMEROS

La palabra polímero proviene del griego *polimeres*, que significa 'constituido de muchas partes'. Los polímeros se definen como sustancias compuestas por moléculas caracterizadas por la repetición múltiple de una o más especies de átomos o grupos de átomos (unidades constitucionales, llamadas monómeros) unidas entre sí en cantidad suficiente para dar un grupo de propiedades que no varían significativamente con la adición o remoción de una o algunas unidades constitucionales.<sup>11</sup>

### Tipos de Polímero

Los polímeros pueden clasificarse de acuerdo al método utilizado para sintetizarlos como polímeros formados en cadena o polímeros producidos en pasos. Los polímeros formados en cadena son llamados también polímeros de adición y se producen mediante una reacción de polimerización en cadena. En esta reacción un iniciador se une al doble enlace carbono-carbono y forma un intermediario muy reactivo, este intermediario reacciona con una nueva molécula del monómero y de nuevo forma un intermediario, el cual reacciona nuevamente con otra molécula del monómero y así sucesivamente. El polímero se forma cuando se unen más monómeros al extremo reactivo de la cadena.

Como iniciador se puede tomar un anión, un catión o un radical y el monómero utilizado puede ser cualquier alqueno sustituido. Un ejemplo es la

---

<sup>11</sup> Enciclopedia of Polymer Science and Engineering



polimerización del etileno que se lleva a cabo utilizando como iniciador un radical.

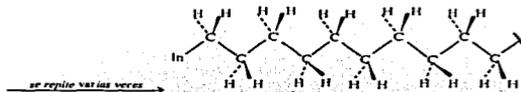
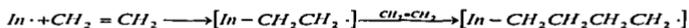


Figura 4. Polimerización del etileno

Los polímeros formados en pasos llamados también de condensación se producen mediante procesos en los cuales el paso de formación del enlace es una reacción polar. Las reacciones se llevan a cabo entre dos moléculas bifuncionales y los enlaces nuevos del polímero se forman de manera independiente a los otros. Generalmente el polímero resultante tiene dos monómeros alternados y en la cadena principal suele tener otros átomos diferentes del carbono. El nylon es un ejemplo muy común de este tipo de polímeros.



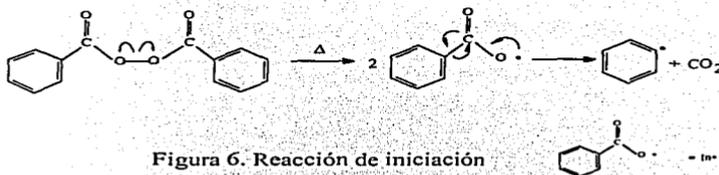
Figura 5. Reacción para elaboración del Nylon 66



## Polimerización por radicales

En todas las reacciones en cadena por radicales se necesitan 3 pasos: iniciación, propagación y terminación.

El primer paso es la iniciación en la cual el catalizador genera pequeñas cantidades de radicales



En el segundo paso uno de los radicales producidos se une al monómero para generar un radical carbono y comenzar la polimerización



Figura 7. Generación del nuevo radical carbono, comienzo de polimerización

Cuando el radical carbono se une a otra molécula de etileno ocurre la propagación, al repetirse varias veces este paso se forma la cadena de polímero



Figura 8. Reacción de propagación



El paso final es la terminación, con lo cual la cadena de polímero se termina debido a las reacciones que consumen al radical. Las formas posibles de que esto suceda son la combinación o la dismutación de dos radicales:<sup>12</sup>

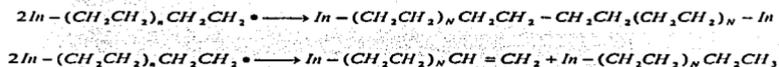


Figura 9. Reacción de terminación

### *Polimerización iónica*

Este tipo de reacción puede ser catiónica o aniónica. La diferencia radica en la naturaleza de los iones en las cadenas poliméricas en crecimiento. Si en el proceso de crecimiento, las cadenas llevan centros positivos, o carbocationes, el mecanismo se llama catiónico y si llevan iones negativos o carbaniones entonces se llama aniónica.

Las dos formas de polimerización se pueden comparar si se examinan los dos tipos de iniciación. La reacción catiónica ocurre por medio de ataques electrofílicos por parte de los iniciadores hacia los monómeros.

<sup>12</sup> McMurry, Química Orgánica, 3ª Edición, Grupo Editorial Iberoamérica, 1994, México

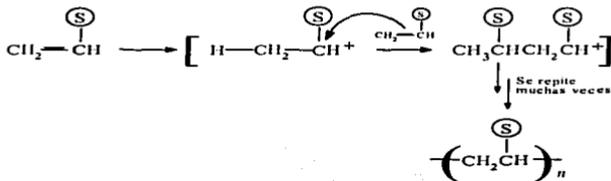
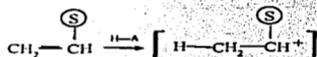
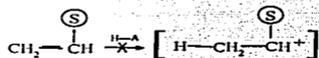


Figura 10. Polimerización catiónica

Los monómeros vinílicos que tienen sustituyentes donadores de electrones se polimerizan más rápido que los monómeros atrayentes de electrones.



Alqueno rico en electrones; el intermediario catiónico se estabiliza cuando el sustituyente es donador de electrones; la reacción se lleva a cabo y es eficiente



Alqueno pobre en electrones; el intermediario catiónico se desestabiliza cuando el sustituyente es atrayente de electrones; reacción deficiente

Un ejemplo muy común de un polímero formado por una reacción catiónica es el del poliisobutileno. Este producto se obtiene tratando el isobutileno (2-metilpropeno) con  $\text{BF}_3$  (catalizador) a  $-80^\circ \text{C}$  y se utiliza para manufactura de cámaras para neumáticos.

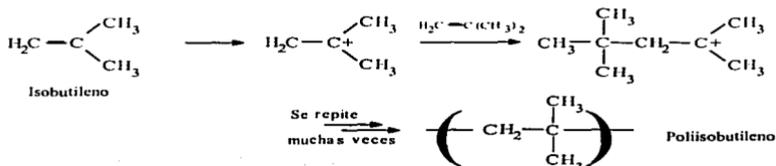


Figura 11. Reacción de formación del poliisobutileno

De la misma manera, la reacción aniónica se lleva a cabo por medio de ataques nucleofílicos.

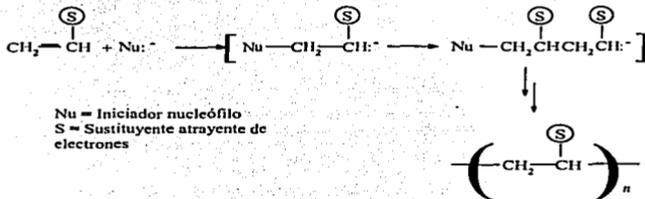


Figura 12. Polimerización aniónica

Como ejemplo de esta polimerización se encuentra el  $\alpha$ -cianoacrilato de metilo de alta pureza, el cual se utiliza en el llamado "superpegamento" que tiene la capacidad de soportar hasta 1000 Kg de peso.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

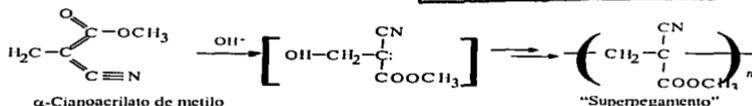


Figura 13. Reacción de formación del "superpegamento"

Generalmente, las polimerizaciones iónicas dependen de la formación inicial de iones positivos y negativos en un medio orgánico. La propagación en este tipo de reacciones en cadena sucede por adiciones sucesivas de unidades monoméricas a los grupos terminales "reactivos" de las cadenas en propagación.

Los estados de transición para los pasos de propagación se forman en sistemas que contienen monómero, iniciador, polímero formado y con frecuencia un solvente. Hay varios tipos de reacciones de iniciación, sin embargo, este tipo de polimerización no termina por combinación o dismutación como sucede con la polimerización por radicales libres; en vez de esto, la terminación es resultado de reacciones unimoleculares o transferencia hacia otras moléculas, como monómeros, disolventes o impurezas (humedad). También pueden ser resultado de la inhibición debida a una adición de una especie que termine con la reactividad.

#### *Polimerización por apertura de anillo*

En este tipo de polimerización el crecimiento de la cadena se da por adiciones sucesivas de la estructura abierta a la cadena polimérica. Como ejemplo se



puede tomar la **polimerización del óxido de etileno**, la cual da como resultado el poli (óxido de etileno)

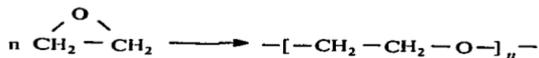


Figura 14. Polimerización por apertura de anillo

Hay una gran diversidad de monómeros cíclicos que polimerizan de esta manera, en la cual se incluyen los alquenos cíclicos, lactonas, lactamas y varios heterocíclicos con más de un heteroátomo en el anillo. Estas polimerizaciones son de carácter iónico y pueden presentar características que son típicas de una polimerización iónica. A pesar de esto no es correcto asumir que esta polimerización se lleva a cabo por mecanismos de propagación de cadena, de hecho, muchas de estas reacciones son de crecimiento por pasos, con el tamaño del polímero lentamente en aumento durante el proceso. Aún así, también existen algunos monómeros cíclicos que polimerizan de manera típica de crecimiento de cadena.<sup>13</sup>



Figura 15. Polimerización de monómeros cíclicos por crecimiento de cadena

Los polímeros pueden agruparse en dos ramas de acuerdo a su comportamiento con la temperatura, termoplásticos y termofijos o

<sup>13</sup> Ravve A, p. 123



---

termoestables. Un termoplástico es aquel que se reblandece y fluye cuando se somete a un calentamiento y vuelve a ser rígido y sólido cuando baja la temperatura. Debido a este comportamiento el plástico puede ser moldeado un número indefinido de veces. Ejemplos de estos materiales son el Polietileno Tereftalato (PET), Polietileno de Baja Densidad, Polietileno de Alta Densidad, Cloruro de Polivinilo, Polipropileno, Poliestireno, Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), Nylon.

Los polímeros termoestables, por el contrario son aquellos que no reblandecen ni fluyen cuando se someten a un calentamiento sino que antes de que fluyan se descomponen, por lo que no pueden ser moldeados más que una vez. Como ejemplo de estos materiales se tienen resinas poliéster, resinas fenólicas, resinas melámicas y poliuretano.

Este comportamiento ante la temperatura se debe a la estructura que mantienen entre sí las cadenas del polímero. Los polímeros termoplásticos contienen cadenas macromoleculares desordenadas, enrolladas sobre sí mismas pero independientes entre sí. Lo único que las mantiene unidas son fuerzas electrostáticas débiles tipo Van der Waals, las cuales desaparecen por acción de la temperatura al aumentar los movimientos moleculares. Al aumentar estos movimientos las moléculas se deslizan unas sobre otras. Este tipo de polímeros se caracterizan también porque pueden ser disueltos por determinados disolventes orgánicos. El disolvente penetra las redes de cadenas poliméricas, debilita las fuerzas de unión entre ellas y las separa.

Los polímeros termoestables o termofijos tienen cadenas moleculares que se encuentran unidas unas a otras tridimensionalmente por fuertes enlaces covalentes; los puntos comunes a varias cadenas se denominan nudos. Al



aumentar la temperatura las cadenas sólo pueden moverse en la extensión que les permita la distancia entre los puntos de unión de las cadenas, es decir, no se pueden desplazar las cadenas entre sí. No se disuelven en disolventes orgánicos y pueden llegar a retenerlos en su estructura.

Dentro de este tipo de polímeros hay varias clasificaciones de acuerdo a sus propiedades, las cuales dependen de la distancia entre los nudos. Si la distancia entre los nudos es muy grande, el compuesto tiene propiedades elásticas y se denomina elastómero. Este tipo de polímeros son los que componen a los cauchos.

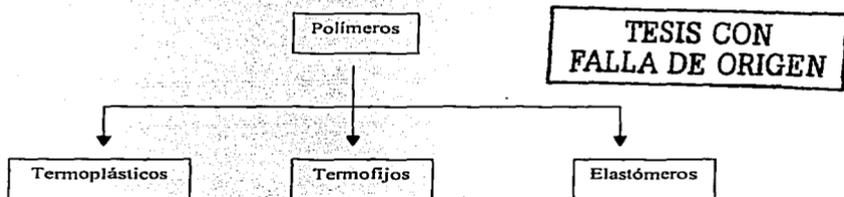


Figura 16. Tipos de polímeros

### *Plásticos*

Plástico se define como un material que contiene como ingrediente esencial una o más sustancias orgánicas poliméricas de alto peso molecular, en su estado final es sólido y, en alguna etapa de su manufactura o procesamiento



---

puede ser moldeado. Los hules, textiles, adhesivos y pinturas pueden coincidir con esta definición, sin embargo, no se consideran plásticos.<sup>14</sup>

### *Diferencia entre plásticos y polímeros*

Tomando en cuenta las definiciones previas se puede concluir que todos los plásticos pueden clasificarse como polímeros debido a que el ingrediente esencial de estas sustancias es un polímero, sin embargo, no todos los polímeros son plásticos ya que las propiedades que caracterizan a los plásticos no son generales para todos los polímeros, por ejemplo, no todos los polímeros son sólidos en su estado final, ni todos pueden ser moldeados.

### *Generalidades sobre los plásticos*

El primer plástico es resultado de un concurso realizado en Estados Unidos en 1860 para encontrar un material que sustituyera al marfil para la realización de bolas de billar. El ganador de este concurso fue John Hyatt quien creó un plástico al que llamó celuloide. Este nuevo material se fabricaba disolviendo celulosa en una solución de alcanfor y etanol, se utiliza actualmente para fabricar objetos como mangos de cuchillo, armazones de lentes y películas cinematográficas. El celuloide forma parte de un tipo de plásticos llamados termoplásticos los cuales se caracterizan por su capacidad de ser ablandados y moldeados varias veces utilizando energía calorífica.

---

<sup>14</sup> "Standard definitions of terms relating to plastics" ASTM D883-86-b, American Society for testing and Materials, Phil. 1986



---

En 1907 Leo Baekeland inventó la baquelita, a este material se le calificó como termofijo o termoestable, esta clase de plásticos se caracterizan porque pueden ser fundidos y moldeados mientras están calientes pero una vez que han fraguado ya no pueden calentarse ni volverse a moldear.

En la década de los 30 los científicos comenzaron a buscar nuevos tipos de plásticos debido al potencial que vieron en ellos, así fue como en Inglaterra se descubrió que el gas etileno polimerizaba mediante la acción del calor y la presión formando un material termoplástico al que llamaron polietileno (PE), después en 1950 se prepara el polipropileno (PP). Cuando se reemplaza un átomo de hidrógeno por uno de cloro en el polietileno se crea el cloruro de polivinilo (PVC) el cual es un plástico duro y resistente al fuego que se utiliza principalmente para cañerías. Si se le agregan algunos aditivos se forma un material más blando que sustituye al caucho, otro plástico parecido al PVC es el politetrafluoroetileno (PTFE) conocido como teflón y utilizado para material antiadherente.

Otro de los plásticos que fueron desarrollados en la década de los 30 fue el poliestireno (PS), el cual es utilizado comúnmente para vasos y recipientes transparentes, un material parecido es el poliestireno expandido (EPS) el cual es una espuma blanca rígida que se utiliza para embalaje y como aislante térmico.

En esta misma década se crea la primera fibra artificial la cual fue llamada nylon, descubierta por Wallace Carothers quien trabajaba para DuPont. Wallace descubrió que si utilizaba hexametildiamina y ácido adípico se formaba un polímero el cual si se bombeaba a través de orificios y se estiraba



---

formaba hilos que podían ser tejidos. Primeramente fue utilizado para fabricar paracaídas para las fuerzas armadas y posteriormente se utilizó en la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos.

En la actualidad se ha desarrollado con rapidez el uso del polietileno tereftalato (PET) que se utiliza para el envasado en botellas y frascos y que desplaza al uso de vidrio y PVC en el mercado de envases.<sup>15</sup>

A continuación se presenta una tabla de los plásticos de mayor uso en la industria junto con la simbología para su identificación, sus características y sus usos principales. Esta tabla se encuentra citada en la norma mexicana NMX-E-232-SCFI-1999 que se titula simbología para la identificación del material constitutivo de plástico.<sup>16</sup> Estos plásticos representan el 75% del consumo de plásticos y el 95% se encuentran en basureros.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> <http://www.erres.org.uy/plastico.htm>

<sup>16</sup> <http://www.erres.org.uy/plastico.htm>

<sup>17</sup> Enciclopedia del plástico 2000, p. 130



| Tipo / Nombre   | Características  | Usos / aplicaciones  |
|---|--|--|
| <br>PET o<br>PETE  | Existen dos tipos: grado botella y grado textil. Se produce a partir del ácido tereftálico y el etilenglicol   | Envases para refrescos, aceites, varios envases (mayonesa, salsa, etc.), películas transparentes   |
| <br>PEAD o<br>HDPE | Se trata de un termoplástico que se fabrica a partir del etileno. Puede ser transformado de varias formas: Inyección, soplado, extrusión o rotomoldeo.   | Envases para: detergentes, aceites automotor, shampoo, lácteos, bolsas para supermercados, cajones para pescados, refrescos y cervezas, baldes para pintura, helados, aceites, tubería para gas, telefonía, agua potable, minería, drenaje y uso sanitario, macetas, bolsas tejidas  |
| <br>PVC o V        | Se produce a partir de dos materias primas naturales: gas 43% y sal común 57%. Para su procesamiento es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para un gran número de aplicaciones. Se obtienen productos rígidos o totalmente flexibles (Inyección - Extrusión - Soplado). | Envases para agua mineral, aceites, jugos, mayonesa. Perfiles para marcos de ventanas, puertas, tubería para desagües domiciliarios y de redes, mangueras, blister para medicamentos, pilas, juguetes, envolturas para golosinas, películas flexibles para envasado (carnes, verduras), cables, papel vinílico (decoración), catéteres, bolsas para sangre |

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



| Tipo / Nombre  | Características  | Usos / aplicaciones  |
|--|--|--|
|  <p>PEBD o<br/>LDPE</p> | <p>Se produce a partir del gas natural. Al igual que el PEAD es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión y Rotomoldeo<br/>Se utiliza para una gran variedad de envases sólo o mezclado con otros materiales y para varias aplicaciones.</p>   | <p>Bolsas de todo tipo, Películas para envasamiento automático de alimentos y productos industriales (leche, agua, plásticos, etc.). Streech film, base para pañales desechables. Bolsas para suero, contenedores herméticos domésticos. Tubos y pomos (cosméticos, medicamentos y alimentos), tuberías para riego</p>   |
|  <p>PP</p>              | <p>Se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando etileno durante el proceso. El PP es un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado Punto de Fusión, excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.), aumentan sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. (El PP es transformado en la industria por los procesos de inyección, soplado y extrusión/termoformado.)</p> | <p>Película para alimentos, cigarrillos, chicles, golosinas, indumentaria. Bolsas tejidas para papas, cereales. Envases industriales. Hilos cabos, cordelería. Tuberías para agua caliente. Jeringas desechables. Tapas en general, envases. Cajones para bebidas. Baldes para pintura, helados. Envases para margarina. Fibras para tapicería, cubrecamas, etc Telas no tejidas pañales desechables. Alfombras. Cajas de batería y autopartes</p> |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



| Tipo / Nombre  | Características  | Usos / aplicaciones  |
|--|--|--|
| <br><b>PS</b> | <p>PS Cristal: Es un polímero de estireno monómero (derivado del petróleo), cristalino y de alto brillo.</p> <p>PS Alto Impacto: Es un polímero de estireno con occlusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto.</p> <p>Ambos PS son fácilmente moldeables a través de procesos de: Inyección, Extrusión/Termoformado, Soplado.</p> | <p>Frascos para lácteos (yoghurt, postres, etc.), helados, dulces, etc. Envases varios, vasos, bandejas de supermercados y rotiserías.</p> <p>Heladeras: contrapuestas, anaques. Cosmética: envases, máquinas de afeitar descartables, platos, cubiertos, bandejas, etc.</p> <p>Juguetes, cassetes, etc.</p> <p>Aislantes: planchas de PS espumado</p> |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

# CAPÍTULO III

## PET



## PET

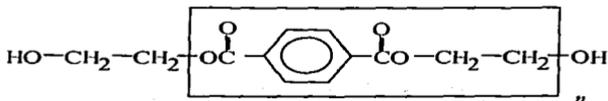


Figura 17. Unidad estructural del PET

PET (polietilen tereftalato) es un poliéster fuerte y de bajo peso que se utiliza generalmente para fabricar contenedores para refrescos, jugos, bebidas alcohólicas, agua, aceites y otras aplicaciones para la industria alimenticia así como para otras industrias. Sus nombres comerciales son Arnite, de Akzo; Crstin, de Ciba Geigy; Gripet, EMS-Chemie; Impet, de Hoechst Celanese; Melinite, de ICI; Rynite, de DuPont; Techser, de Rhône-Poulence y Valox, de GE Plastics.

El PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire.

A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se hace combinando el ácido tereftálico y el etilenglicol, a partir de estas dos sustancias se obtiene una resina<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> <http://www.petcore.org>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

Los objetos fabricados con PET se identifican, en el sistema de identificación americano SPI (Society of the Plastics Industry), con el siguiente símbolo en la parte inferior o posterior:



Figura 18. Símbolo de identificación del PET

### Historia del PET

El PET fue primeramente desarrollado para la fabricación de fibras sintéticas por Whinfield y Dickinson en 1941, la patente fue vendida después a DuPont y a ICI. Aunque fue originalmente producido para fibras el PET comenzó a ser utilizado para películas de empaque a mediados de la década de los 60 y después a principios de los 70, se desarrolló comercialmente la técnica de soplado biaxial para fabricación de botellas.

Para la fabricación de botellas se derrite la resina que está en forma de pequeños cilindros llamados pellets y se inyecta en un molde en el cual se hace una preforma. La preforma tiene forma de un pequeño tubo de ensayo más pequeño que el tamaño que tendrá la botella pero con paredes más gruesas y es moldeada por soplado. Durante esta fase se sopla aire a alta presión al interior de la preforma, la cual toma la forma del molde en el que fue introducida previamente<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> [http://www.plastivida.com.ar/1\\_usos.htm](http://www.plastivida.com.ar/1_usos.htm)



---

### Clasificación de acuerdo al uso

De acuerdo con las características de polimerización el PET se clasifica en cuatro grados, que se distinguen por su peso molecular:

- a) Grado fibra
- b) Grado película y lámina
- c) Grado botella
- d) Grado ingeniería

El grado final del PET se determina en la etapa de polimerización, por medio de su viscosidad intrínseca y su peso molecular; estas dos características dependen del número de unidades de monómero en la configuración del polímero. El arreglo en el PET grado fibra se caracteriza por tener moléculas largas, delgadas y filiformes que se encuentran estiradas una al lado de la otra, alineadas en forma de la fibra de manera que la entropía es menor que la entalpía.

El PET grado ingeniería y el grado botella se caracterizan por tener arreglos transversales que forman estructuras tridimensionales irregulares y rígidas, por lo que su resistencia es mayor a la del polímero grado fibra. La diferencia entre estos dos materiales es el menor rango de temperatura para el uso de grado botella y mayor viscosidad intrínseca del PET grado ingeniería en el proceso de fabricación del pellet, es decir, mayor promedio de moléculas que



---

definen al polímero, esta última característica permite mayor rigidez en la estructura.

A continuación se detallan las características de los cuatro grados diferentes de PET

#### *PET grado fibra*

Existen dos tipos principales, textil e industrial. Este tipo de PET tiene una resistencia elevada a la tensión y abrasión, también presenta buena resistencia química a hidrocarburos aromáticos, alcoholes, detergentes, soluciones acuosas de ácidos débiles y fuertes, luz solar, microorganismos y blanqueadores.

#### *PET grado película y lámina*

Se caracteriza por su alta resistencia a la tensión, elevada transparencia y brillo superficial, forma una barrera contra gases, principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  y contra paso de olores. Tiene baja retención de humedad, no es tóxica y es inerte a la formación de hongos y bacterias. Estas características permiten que sea utilizada en aplicaciones del sector envase y empaque para laminaciones con aluminio, papel y otros plásticos destinados a prolongar la vida de anaquel de artículos perecederos.



---

Se utiliza también para fabricar películas sensibilizadas para fotografía y rayos X gracias a sus excelentes propiedades de resistencia química a disolventes orgánicos, alcoholes y aceites.

### *PET grado botella*

Este tipo de PET no requiere aditivos en su elaboración por lo que se considera completamente puro o inerte. Es excelente barrera para gases, especialmente CO<sub>2</sub>, por lo que es ideal para almacenamiento de bebidas gaseosas. Su resistencia al impacto y a la tensión es muy buena, este material soporta caídas libres sobre concreto hasta de 3 m de altura sin presentar consecuencias explosivas.

### *PET grado ingeniería*

En forma natural es un material fácilmente inflamable, funde y gotea y la flama permanece aún después de alejarla del contacto del fuego. Es un material semirígido de gran resistencia a la deformación, gran tenacidad, alta estabilidad dimensional, bajos coeficientes estáticos y de fricción y de buena resistencia al impacto.

Actualmente las resinas de este material se formulan a partir de PET virgen o de PET grado botella. 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 fibra de vidrio para reforzar la estructura de los productos moldeados.



---

## Producción de PET

### *Producción de PET a partir de Dimetil Tereftalato*

La producción industrial del PET puede ser en reactores tipo batch o en reactores continuos. Se utilizan recipientes separados para fundir los compuestos que serán utilizados y para las reacciones de transesterificación y policondensación.

El Dimetil tereftalato (DMT) se funde a 150-160° C en un tanque agitado que es calentado con vapor o electricidad y que tiene una atmósfera inerte (nitrógeno).

### *Transesterificación.*

El DMT fundido y el etilenglicol reaccionan en un reactor de transesterificación agitado que es calentado a 150-200° C. Al inicio de la reacción (a presión normal y con atmósfera de nitrógeno) se prefiere la temperatura más baja para minimizar la sublimación del DMT. El metanol que se genera durante la transesterificación se separa continuamente de la mezcla de reacción. Se necesita utilizar un catalizador para lograr una razón de transesterificación razonable a temperaturas moderadas. Generalmente como catalizadores se utilizan compuestos básicos débiles como aminas, óxidos metálicos, alcóxidos y acetatos a una concentración de 0.01- 0.1 % peso con respecto al DMT. La transesterificación debe ser cuantitativa debido a que los grupos residuales metil ester pueden interferir con las policondensaciones sucesivas.



---

### *Policondensación*

El producto de la transesterificación se añade fundido al reactor de policondensación, el cual puede ser calentado hasta 300° C y debe estar equipado con un agitador eficiente. El exceso de etilenglicol generalmente se destila a presión normal aumentando gradualmente la temperatura hasta 250° C. Después se reduce la presión y aumenta la temperatura para la reacción de policondensación. Para obtener masas moleculares lo suficientemente altas se requieren temperaturas de 270 – 280° C y vacío de <1 mbar.

De la misma manera que la reacción de transesterificación, la reacción de policondensación debe acelerarse con catalizadores. Los catalizadores utilizados para la transesterificación pueden ser también utilizados para la policondensación ya que estas dos reacciones son muy similares. El catalizador que queda en la mezcla reaccionante después de la transesterificación puede ser utilizado para la policondensación, sin embargo, este procedimiento no da resultados satisfactorios porque los catalizadores utilizados en la transesterificación disminuyen la estabilidad térmica del PET, en muchos casos se ocultan estos catalizadores con aditivos adecuados (compuestos fosforados) y se reemplazan con catalizadores especiales como antimonio, germanio, titanio o compuestos de plomo en concentraciones de 0.005- 0.05 % en peso con respecto al DMT.

La policondensación se detiene cuando se alcanza una viscosidad determinada, un indicador adecuado de la viscosidad del producto es el consumo de energía del agitador. Para terminar la policondensación se elimina el vacío del reactor con nitrógeno y se expulsa el producto utilizando



---

presión o preferentemente con bombas rotatorias. La mezcla se enfría directamente con agua y se transforma en chips o pellets para prevenir oxidación con el oxígeno atmosférico.

Antes de ser procesado, el PET debe ser secado a 80-130° C para reducir el contenido de agua hasta 0.01 % en peso. Los pellets son sometidos a una postcondensación de fase sólida por un tiempo prolongado (20h) a temperaturas mayores a 250° C en una corriente de gas inerte para aumentar la masa molecular.

#### *Producción de PET a partir de ácido tereftálico (AT)*

Este proceso es importante para la producción de PET grado fibra, los productos obtenidos por medio de este proceso pueden competir en calidad con los obtenidos en el proceso DMT. Las ventajas de este proceso sobre el proceso DMT son:

- 1) Mayor velocidad de reacción
- 2) Menor peso del AT comparado con el DMT (costos de almacenamiento)
- 3) Uso de agua en vez de metanol como agente de condensación
- 4) Se obtienen mayores pesos moleculares



Se mantienen temperaturas de alrededor de 220-260° C para mejorar la solubilidad del AT. El agua que se forma es destilada continuamente. La relación molar de etilenglicol – AT debe ser <2 para evitar la formación de dietilenglicol. Es posible tener esterificación directa sin utilizar catalizadores, pero se puede acelerar este proceso utilizando catalizadores básicos (aminas) o catalizadores de transesterificación (usualmente  $Sb_2O_3$ ).

A la esterificación sigue una liberación de presión, la temperatura aumenta simultáneamente y el exceso de etilenglicol es destilado. La formación del PET se lleva a cabo en la etapa de policondensación, la cual procede de la misma manera que el proceso DMT- etilenglicol.

Se puede lograr esterificación directa a presión normal en un medio reaccionante de precondensado de PET, en el cual el AT es soluble. Este proceso es adecuado para esterificación directa continua.

Las reacciones secundarias que ocurren durante la policondensación definen la calidad del PET. La formación de éter provoca unidades de dietilenglicol que tienen efecto adverso en el teñido del producto y también baja estabilidad térmica y UV. Los grupos carboxílicos libres tienen una influencia negativa en la poscondensación y la estabilidad de hidrólisis del PET. La pirólisis del éster da como resultado productos de descomposición olefínica que llevan a la decoloración del PET<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5a Ed. Vol A21 p 232-249



---

El PET es muy utilizado en la fabricación de botellas las cuales son ligeras, generalmente no se estrellan y son potencialmente reusables. El impulso que llevó al desarrollo de estas botellas fue la reducción de costos por transporte.

El problema técnico principal que se enfrenta en la manufactura de botellas termoplásticas es la permeabilidad al oxígeno y al dióxido de carbono de la pared de la botella, debido a que esto afecta directamente la vida en el anaquel del contenido. Un avance muy importante en el proceso de producción de botellas fue la invención del proceso de moldeo por soplado de PET en 1973. En este proceso, la pared de la botella es sometida a una etapa de estiramiento biaxial rápido con lo cual aumenta su orientación molecular, esta etapa aumenta la resistencia mecánica de la botella y además reduce la permeabilidad al dióxido de carbono de las paredes.

### Métodos de Moldeo

#### *Proceso de Moldeo por Soplado*

En este proceso se moldea una preforma de PET por medio de un proceso convencional de moldeo por inyección. La preforma tiene la apariencia de un tubo de ensayo con paredes gruesas y el cuello en forma de rosca. En la segunda etapa, las preformas se calientan en un molde a una temperatura cuidadosamente controlada por encima de la temperatura de transición vítrea, generalmente de 90 a 100° C. El molde tiene la forma y el tamaño de la botella terminada y la preforma es sometida a un proceso de estiramiento biaxial utilizando una combinación de deformación mecánica e soplado con aire a presión. Un alineador de metal pasa por la preforma y la alarga



parcialmente en dirección axial; simultáneamente se aplica aire seco a presiones de 50 –100 psi para inflar las paredes de la preforma para llenar el molde, lo que da como resultado el estiramiento radial. Después el molde es abierto para permitir que la botella se enfríe. Este proceso da como resultado un estiramiento radial y axial de las paredes de la botella lo cual causa una cristalización inducida por esfuerzo que resulta en un contenedor con mayor resistencia, claridad y mucha resistencia contra rupturas por condiciones ambientales.

Una botella común de 2 litros pesa aproximadamente 50 g y el grosor de sus paredes es de aproximadamente 0.38 mm. Las técnicas se han mejorado para minimizar los tiempos de producción. El proceso da como resultado una botella con base hemisférica que no es capaz de permanecer parada en un anaquel. Durante varios años se adicionaba una base plana de polietileno de alta densidad que se aseguraba con un adhesivo a las botellas de PET utilizadas para refresco. Esto aumentaba los costos debido al material adicional y las etapas de producción además de que interfería con el reciclaje. Estos problemas fueron superados mediante la invención de las bases llamadas “petaloides” que tenían una base con un patrón de cinco o seis lóbulos. A partir de entonces fue posible una botella de una pieza, completamente orientada en forma biaxial que podía permanecer parada en un anaquel.

Las resinas de las botellas de PET usualmente son de alto peso molecular (Viscosidad Intrínseca de 0.75 – 0.90 dL/g) de manera que las preformas puedan ser sometidas al proceso de soplado sin problemas. Debido a que la viscosidad intrínseca es demasiado alta se lleva a cabo una polimerización en estado sólido. El polímero base se fabrica en una planta continua de



---

polimerización en líquido utilizando esterificación directa de etilenglicol con ácido tereftálico o transesterificación utilizando dimetil tereftalato puro el cual generalmente se recupera de botellas de PET reciclado.

Primero, el ácido y el glicol se mezclan vigorosamente para formar una pasta añadiéndoles un catalizador y algunos estabilizadores. La pasta se bombea hacia los esterificadores en donde se alimenta agua. La mezcla fundida de polímero y oligómeros pasa por varias etapas de polimerización: un prepolimerizador, un polimerizador intermedio que en algunas plantas de mayor capacidad puede dividirse en etapas de polímero de alta y de baja, y finalmente el producto fundido llega al polimerizador de alta o a la etapa de terminación en donde la viscosidad intrínseca es aproximadamente de 0.65 dL/g. Durante las etapas el producto fundido se vuelve cada vez más viscoso y se debe aplicar alto vacío en la etapa final para completar la reacción.

A la salida del polimerizador de alta se realiza una extrusión continua del polímero fundido, los hilos obtenidos se introducen a un baño de agua y una vez enfriados se cortan en pequeños chips de aproximadamente 2.5-3.5 mm. Estos pellets frecuentemente se secan y se pasan hacia los cristalizadores, los cuales tienen generalmente varias etapas, en las cuales son templados en estado sólido por encima de  $T_g$  (temperatura de transición vítrea), y gradualmente se aumenta la temperatura hasta estar cerca al punto de máxima cristalización. Se agitan lentamente para prevenir la aglomeración mientras se llevan hacia el polimerizador final.

Durante la etapa de cristalización la densidad del pellet aumenta de 1.333 hasta 1.400 g/cm<sup>3</sup>. Finalmente los pellets pasan hacia las torres de fase sólida,



---

en donde descienden lentamente por acción de la gravedad con flujo tapón a través de una zona larga y caliente que tiene un flujo a contracorriente de gas inerte que tiene como propósito arrastrar los subproductos volátiles.

El acetaldehído es uno de los productos más objetables en la polimerización del PET ya que afecta el sabor de los refrescos de cola en concentraciones de 60 ppm.

### Mercado

En la actualidad un mercado para contenedores fabricados por soplado que ha crecido bastante es el llamado mercado de llenado en caliente, que comprende artículos como las botellas de catsup, jugos pasteurizados y aderezos para ensalada los cuales son empacados mientras están todavía calientes. En estos casos el PET no es muy adecuado debido a su  $T_g$  relativamente baja ( $70^\circ\text{C}$ ) lo que provoca una gran deformación de la botella si la temperatura del contenido se acerca a esta temperatura. Esto puede solucionarse dando un tratamiento térmico en condiciones controladas de  $160\text{--}220^\circ\text{C}$ , sin embargo, esta solución introduce un paso más en el proceso y puede causar opacidad en algunas partes de la botella<sup>21</sup>.

---

<sup>21</sup> Kirk Othmer Enciclopedia of Chemical Technology, Vol. 19, 4a Ed., Wiley Interscience, USA 1996.

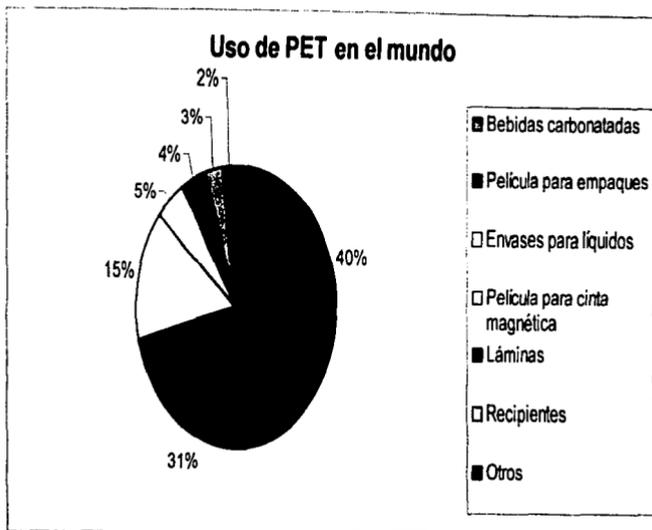


Figura 19. Uso de PET en el mundo<sup>22</sup>

<sup>22</sup> International Fiber Journal, June 1999 – Vol 14, Issue 3

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE PET EN EL MUNDO

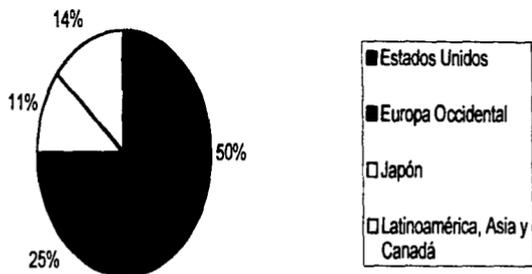


Figura20. Distribución del consumo de PET en el mundo<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Idem

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Consumo de PET en el mundo (M.TONS)

|                 | 1990   | 1994   | 1998   |
|-----------------|--------|--------|--------|
| <b>Fibras</b>   | 8,500  | 11,157 | 16,500 |
| <b>Botellas</b> | 1,200  | 2,460  | 4,200  |
| <b>Película</b> | 900    | 1,000  | 1,200  |
| <b>Otros</b>    | 900    | 1,000  | 850    |
| <b>Total</b>    | 11,500 | 15,617 | 22,750 |

Tabla 2. Consumo mundial de PET (M. Tons)<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Idem

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

# CAPÍTULO IV

# POLIETILENO



---

## POLIETILENO

Se trata de una poliolefina que contiene estructuras más simples que el PET y que no necesita que se le añadan aditivos plastificantes, es un material termoplástico que puede tener varias formulaciones con propiedades tan útiles como dureza a temperaturas que se encuentran entre  $-57$  y  $+93^{\circ}\text{C}$ , flexibilidad existiendo polietileno flexible o rígido; y resistencia química excelente. Este plástico puede fabricarse utilizando cualquiera de los procesos para la producción de termoplásticos. Después de ser fabricado tiene forma de gránulos o pellets los cuales se utilizan como materia prima para crear diferentes tipos de materiales plásticos por medio de procesos de extrusión, moldeo e inyección.

El polietileno existe en diferentes variedades dependiendo de su aplicación final. Aún así, existen dos formas que son las más conocidas de polietileno: Polietileno de Alta Densidad PEAD o HDPE por sus siglas en inglés y el polietileno de baja densidad PEBD. El PEBD a su vez es producido en dos tipos diferentes: PEBD Convencional y PEBD Lineal.

Las formulaciones se clasifican principalmente por la densidad (gravedad específica) de la resina: (1) ASTM tipo I, gravedad específica 0.912-0.925, generalmente designado como de baja densidad, regular, convencional o polietileno de alta presión; (2) ASTM tipo II, gravedad específica 0.925-0.940, conocido comúnmente como de densidad intermedia y (3) ASTM tipo III, gravedad específica 0.940-0.965, llamado comúnmente de alta densidad, lineal, o polietileno de baja presión.



---

Las características de las distintas variedades del polietileno son:

- Versátil (es útil para varias aplicaciones)
- Aislante eléctrico
- Transparente, opaco o de diferentes colores
- Resistente a bajas temperaturas
- Higiénico
- Inerte a los ataques de productos químicos
- Barrera contra la humedad
- Económico

El polietileno se produce a partir del etileno que es un derivado del gas natural. Para producir etileno el gas se introduce en un reactor de polimerización en presencia de un catalizador y sometido a condiciones específicas de presión y temperatura. De esta manera se producen las cadenas poliméricas de polietileno que contienen aproximadamente entre 100 y 30,000 átomos de carbono de acuerdo con la ecuación:

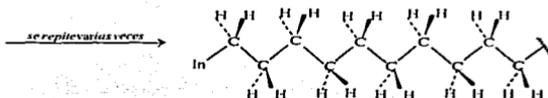
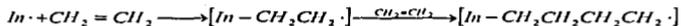


Figura 21. Producción del Polietileno

La reacción es exotérmica y puede llegar a formar polímeros con pesos moleculares desde 1,000 hasta 1 millón. El proceso a alta presión, que normalmente produce los tipos I y II, utiliza como catalizadores oxígeno, peróxido u otros oxidantes fuertes. Las presiones de reacción van desde 15,000 psi hasta 40,000 psi. El polímero formado en este proceso es altamente ramificado, las ramificaciones ocurren generalmente cada 15 o 40 átomos de carbono de la cadena principal. Este tipo de polietileno tiene una cristalinidad de aproximadamente 65%.

El proceso de baja presión normalmente genera el polietileno tipo III, aunque algunas variaciones producen los tipos I y II. Generalmente los catalizadores son alquilmetales combinados con haluros metálicos u óxidos metálicos activados. Las presiones de reacción generalmente son de 50-200 psi. Los polímeros producidos son más lineales, las ramificaciones ocurren cada 1000 átomos de carbono. Su cristalinidad es aproximadamente de 85%.

Los usos de productos de polietileno incluyen artículos caseros moldeados por inyección, contenedores, partes de automóviles y juguetes; películas extruidas, cables eléctricos para chaquetas aislantes, tuberías y recubrimientos; botellas de moldeo por soplado, tanques moldeados de forma rotatoria y juguetes.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## Polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE)

El *polietileno de alta densidad* es un polímero de cadena lineal no ramificada.

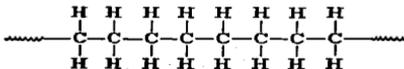


Figura 22. Estructura del polietileno de alta densidad

Se obtiene por **polimerización** del etileno a presiones relativamente bajas (1-200 atm), con catalizador **alquilmetálico** (catálisis de Ziegler) o un óxido metálico sobre sílice o **alúmina** (procesos Phillips y Standard Oil). Ofrece resistencia química y térmica, opacidad, impermeabilidad y dureza superiores a las del polietileno de baja densidad. Este grado de polietileno representa alrededor del 50% del mercado de botellas de plástico.<sup>25</sup>

Se emplea en la **construcción** y también para fabricar prótesis, envases, recipientes para gases y **contenedores** de agua y combustible. Los objetos fabricados con **HDPE** se **identifican**, en el sistema de identificación americano SPI (Society of the Plastics Industry), con el siguiente símbolo en la parte inferior o posterior:



Figura23. Símbolo de identificación del PEAD

<sup>25</sup> Enciclopedia del plástico 2000, p.132

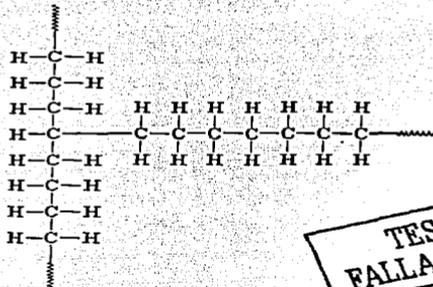
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El polietileno de alta densidad se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango entre 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor. El polietileno con peso molecular entre 3.000.000 y 6.000.000 se denomina **PEUAPM** (*Polietileno de Ultra alto Peso Molecular*). Con este material se producen fibras, tan fuertes, que pueden utilizarse para fabricar chalecos a prueba de balas.

#### Polietileno de baja densidad (PEBD, LDPE)

El *polietileno de baja densidad* es un polímero de cadena ramificada.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 24. Estructura del polietileno de baja densidad



Se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones (aproximadamente 1200 atm y 200° C) con oxígeno o catalizador de peróxido y por mecanismo de radicales libres. Es un sólido más o menos flexible, según el grosor, ligero y buen aislante eléctrico. Es un material plástico que por sus características y bajo costo se utiliza mucho en envasado, revestimiento de cables y en la fabricación de tuberías. Los objetos fabricados con LDPE se identifican, en el sistema de identificación americano SPI (Society of the Plastics Industry), con el siguiente símbolo en la parte inferior o posterior:



Figura 25. Símbolo de identificación del polietileno de baja densidad

El *polietileno lineal de baja densidad* se obtiene polimerizando el etileno con un alqueno (especialmente 1-buteno) a baja presión, en disolución, suspensión o fase gaseosa y en presencia de catalizadores. Se trata de un polímero con ramificaciones muy cortas y uniformes que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores a las del polietileno de baja densidad. Se utiliza en el recubrimiento de cables y en la fabricación de objetos moldeados por extrusión o soplado<sup>26</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>26</sup> <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polietileno.htm>



Características de los diferentes tipos de polietileno

| Tipo   | Ramificación | Cristalinidad | Densidad       | Resistencia | Estiramiento |
|--------|--------------|---------------|----------------|-------------|--------------|
| PEAD   | Pequeña      | 70 – 80 %     | 0.96 –<br>0.94 | Alta        | Bajo         |
| PELBD  | Media        | 50 – 60 %     | 0.94 –<br>0.92 | Media       | Medio        |
| PEBD   | Grande       | 40 – 50 %     | 0.92 –<br>0.86 | Baja        | Alto         |
| PEUAPM | Pequeña      | 70 – 80 %     |                | Alta        | Bajo         |

Tabla 3. Características de los diferentes tipos de polietileno

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

## Propiedades del Polietileno

### *Mecánicas*

Las propiedades mecánicas varían de acuerdo con la densidad y el índice de fusión. Los polietilenos de baja densidad son flexibles y duros; los de alta densidad son rígidos y tiene resistencia a la deformación plástica bajo carga constante. El índice de fusión afecta principalmente la rigidez del material, a menor índice de fusión el polietileno tiene mayor rigidez.

### *Eléctricas*

El polietileno es uno de los más importantes materiales para aislamiento en cables debido a sus características dieléctricas a cualquier frecuencia y a su alta resistividad eléctrica.

### *Térmicas*

Cuando se encuentra sin carga, el polietileno tiene buena resistencia térmica. Si se somete a cargas pequeñas se puede deformar a temperatura relativamente bajas. La estabilidad dimensional del polietileno es suficientemente buena. Los cambios dimensionales causados por cristalización durante el enfriamiento ocurren en un patrón no uniforme, lo que causa formación de combaduras, este defecto se encuentra más a menudo en resinas de moldeo de alta densidad.



---

## *Ambientales*

El rompimiento de los enlaces moleculares debido a esfuerzos internos y externos en presencia de ciertos compuestos se llama rompimiento por esfuerzo ambiental. Existen fracturas moleculares pequeñas en regiones amorfas que se propagan hasta que aparecen rupturas visibles. Los agentes químicos que aceleran este proceso incluyen detergentes, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, jabones, aceites animales, vegetales o minerales, plastificantes tipo ester, ácidos orgánicos, aldehídos, cetonas y alcoholes. No existe una prueba para el rompimiento por esfuerzo. El polietileno con bajo índice de fusión tiene mayor resistencia a este proceso que los materiales con alto índice de fusión con la misma densidad fabricados por el mismo proceso. Mientras más flexible es el material de baja densidad desarrolla un esfuerzo interno bajo lo que causa una mejor resistencia al rompimiento por esfuerzos.

El polietileno sin color puede deteriorarse cuando se expone al ambiente, la luz ultravioleta causa oxidación fotoactivada. Esto se corrige añadiendo 2-2.5% de negro de humo bien dispersado y algunos estabilizadores. El negro de humo evita que penetre la luz ultravioleta.

Los polietilenos que no tienen modificaciones son inflamables, su coeficiente de ignición es aproximadamente 1-1.5 in./min, sin embargo, existen formulaciones de auto-extinción.

## *Resistencia Química*

A temperatura ambiente, el polietileno es insoluble en casi todos los solventes orgánicos, aunque puede suavizarse, hincharse o agrietarse por efecto del



---

ambiente. En condiciones de alta temperatura algunos ácidos concentrados y agentes oxidantes atacan químicamente al polietileno. Sobre los 60° C el material se vuelve soluble en hidrocarburos alifáticos y clorados. La resistencia química aumenta ligeramente si se aumenta la densidad.

#### *Adsorción y Permeabilidad*

El polietileno es resistente al agua y es una buena barrera contra el vapor de agua. Menos del 0.1% del agua se adsorbe en un disco de 2 in de diámetro y 1/8 in de grosor. El polietileno no tiene una retención satisfactoria del vacío.

#### Fabricación

Los métodos principales utilizados para la obtención de polietileno son moldeo por inyección, moldeo por soplado, extrusión en película o lámina, extrusión en tubo y proceso de fusión térmica.

*Moldeo por inyección:* El polietileno de cualquier índice de fusión se fabrica en máquinas de moldeo tipo tornillo. Los polietilenos con altos índices de fusión se utilizan para partes delgadas de ciclos rápidos que no necesiten propiedades físicas rigurosas. Las resinas de bajo índice de fusión se utilizan para partes con paredes más gruesas con especificaciones rigurosas de resistencia a impactos. Para este proceso se requiere más control en la temperatura.

*Moldeo por soplado:* Las resinas con bajo índice de fusión son más adecuadas para este tipo de moldeo ya que durante el proceso el polietileno es extruido



---

hacia abajo como un tubo el cual debe tener suficiente fuerza para evitar alargarse por acción de su propio peso.

*Extrusión en película o lámina:* El polietileno es extruido como película para utilizarse en aplicaciones de embalaje o de películas industriales. El extrusor debe soportar cargas de calor altas y desarrollar coeficientes de esfuerzo cortante altos.

*Extrusión en tubo:* Generalmente los tubos se forman en bobinas para manejarse con mayor facilidad. Se utiliza el polietileno de bajo índice de fusión para producir tubos con resistencia a largo plazo contra explosiones.

*Fusión Térmica:* Este proceso se utiliza para fabricar tanques, tambores y pequeños botes. Se utiliza el moldeo rotacional para producir partes huecas completamente cerradas a partir de polietileno en polvo.

*Termoformado:* Se utilizan resinas de alta densidad, este método requiere productos de bajo índice de fusión para evitar debilitación durante la etapa de calentamiento. Se requieren largos ciclos de calentamiento debido a la baja conductividad térmica y la alta temperatura de emblandecimiento del polietileno.

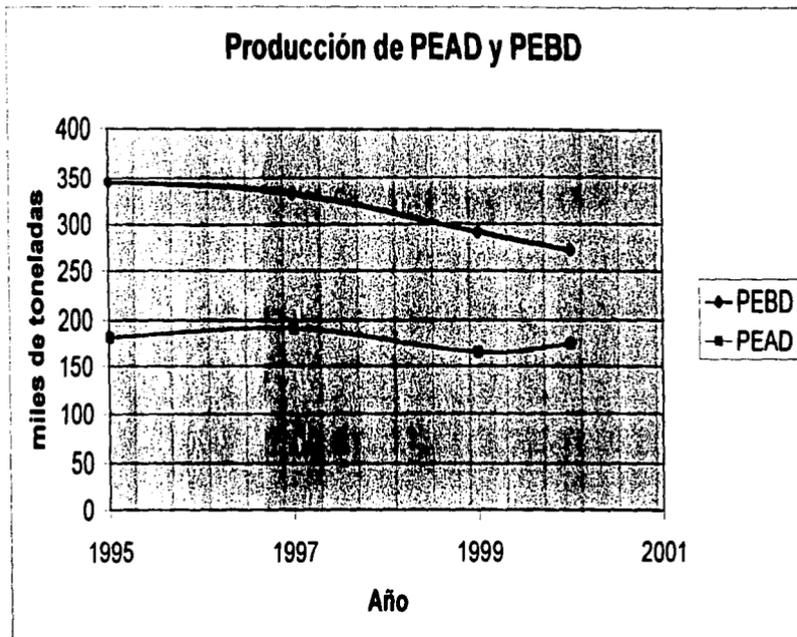


Figura 26. Producción de PEAD y PEBD en México<sup>27</sup>

<sup>27</sup> ANIQ, anuario estadístico

**TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN**



---

# CAPITULO V

## RECICLAJE DE

### PLÁSTICOS



---

## RECICLAJE DE PLÁSTICOS

El plástico puede visualizarse como un material aséptico y limpio que permite que el consumo de materias primas para su elaboración se minimice y que el uso de estas materias una vez transformadas se maximice, fomentando una cultura de recuperación y reutilización.

El plástico ayuda a la conservación del medio ambiente disminuyendo la deforestación y contaminación al reemplazar a otros materiales. El porcentaje de petróleo extraído que se utiliza para fabricar plásticos es solamente un 5%, por otra parte se requiere de menor energía que para la fabricación de otros materiales y al ser utilizados en el sector automotriz el consumo de combustible se reduce.<sup>28</sup>

Sin embargo, en las últimas décadas, los plásticos han tenido que enfrentar uno de los mayores retos ya que lo que antes se consideraban ventajas como su resistencia a la degradación y economía con respecto a otros materiales, ahora se cuestiona debido al impacto ambiental. Es entonces cuando el reciclaje presenta como beneficios el mejoramiento ecológico y la creación de nuevas industrias lo cual da como resultado una reducción en la contaminación y la creación de nuevas fuentes de empleo y contribución a la economía del país.

El reciclaje de materiales plásticos adquirió su importancia en los años 80, cuando empresas como Union Carbide inician investigaciones para la recuperación de plásticos por el método de pirólisis. Posteriormente,

---

<sup>28</sup> Enciclopedia del plástico, p. 119



compañías automotrices como Ford y GM propusieron el método de hidrólisis para recuperar espumas de poliuretano y la empresa Upjon Co. patentó el proceso de glicólisis para recuperar este tipo de espumas eliminando el riesgo de generar ácido cianhídrico o cianuro por la combustión de poliuretano durante la incineración.<sup>29</sup>

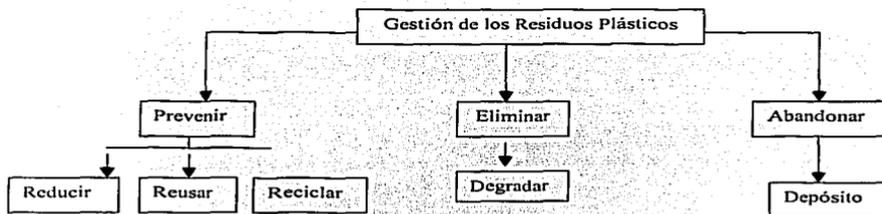


Figura 27. Diagrama de la Gestión de los Residuos Plásticos

El reciclaje es una de las alternativas más utilizadas para la reducción del volumen de los desperdicios sólidos, esta técnica consiste en volver a utilizar materiales que fueron desechados y que aún son aptos para elaborar o refabricar otros productos.<sup>30</sup> Específicamente, reciclar se define como la “circulación de materiales dentro de un sistema cerrado con el propósito de optimizar recursos, disminuir generación de basura, propiciar la separación de desperdicios e introducir los mismos al sistema productivo para generar artículos útiles al hombre”.<sup>31</sup>

<sup>29</sup> Enciclopedia del plástico 2000, p. 120

<sup>30</sup> <http://ponce.inter.edu/whoiswho/organiza/abacus/ismael/recycle.html>

<sup>31</sup> Enciclopedia del plástico, p. 119

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



---

En lugares como Estados Unidos, los residuos plásticos representan un 8 o 10% del total de desperdicios. La mayoría de los esfuerzos para reciclar este tipo de residuos se han enfocado en botellas de PET para refrescos y en una menor proporción en botes de leche hechas de polietileno de alta densidad. De acuerdo con la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (US EPA) sólo un 1 % de los desechos plásticos post consumo son reciclados<sup>32</sup>. En México las cifras son similares, como se puede observar en la tabla 4.

### Tipos de Reciclaje

Se han desarrollado varias técnicas para promover o mejorar el reciclaje de plásticos, los diferentes tipos son: primario, secundario, terciario y cuaternario. La decisión sobre cuál de estos tipos de reciclaje utilizar depende de factores como la limpieza y homogeneidad del material, el valor del material de desecho y la aplicación final.

#### *Reciclaje Primario*

Consiste en la conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original. Este tipo de reciclaje se utiliza con materiales termoplásticos como el PET, PEAD, PEBD, PP (polipropileno), PS (poliestireno) y PVC (cloruro de polivinilo). Esto es posible debido a la habilidad de los termoplásticos para volverse a fundir a bajas temperaturas sin ningún cambio en su estructura ya que sus moléculas se encuentran en un alineamiento casi paralelo.

---

<sup>32</sup> Polymer Recycling, p. 32



**DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES, 1995-2000**  
(Miles de toneladas)

| Concepto   | 1995    | 1996    | 1997    | 1998    | 1999    | 2000    |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Total de residuos sólidos municipales generados</b> | 30509.6 | 31959.4 | 29272.4 | 30550.5 | 30961.1 | 30733   |
| <b>Recolección</b>                                     | 21357   | 22371.3 | 22539.8 | 25854.9 | 25830.9 | 25640.5 |
| <b>Porcentaje de residuos sólidos recolectados</b>     | 70.0    | 70.0    | 77.0    | 84.6    | 83.4    | 83.4    |
| <b>Disposición</b>                                     |         |         |         |         |         |         |
| <b>Rellenos de tierra controlados</b>                  | 5952    | 8573    | 10270   | 15877.1 | 16428.7 | 14490.5 |
| <b>Rellenos de tierra no controlados</b>               | 2555    | 2606    | 1657.5  | 1007.5  | 507.5   | 2421.8  |
| <b>Tiraderos a cielo abierto</b>                       | 21796.1 | 20564   | 17125.9 | 13459   | 13815.3 | 13612.6 |
| <b>Reciclaje</b>                                       | 206.6   | 216.4   | 219.1   | 206.9   | 209.7   | 208.2   |
| <b>% en rellenos de tierra controlados</b>             | 19.5    | 26.8    | 35.1    | 52.0    | 53.1    | 47.1    |
| <b>% en rellenos de tierra no controlados</b>          | 8.4     | 8.2     | 5.7     | 3.3     | 1.6     | 7.9     |
| <b>% en tiraderos a cielo abierto</b>                  | 71.4    | 64.3    | 58.5    | 44.1    | 44.6    | 44.3    |
| <b>% reciclado</b>                                     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     |

Tabla 4. Disposición de los residuos sólidos en general<sup>33</sup>

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>33</sup> <http://www.inegi.gob.mx>

A menudo este tipo de reciclado se denomina reciclado mecánico. La mayoría de los plásticos reciclados de esta forma proviene de productos de consumo. El proceso utilizado para este reciclaje consiste en separación, limpieza, peletizado, moldeado, moldeado por inyección, moldeado por compresión y termoformación. Los plásticos de post consumo se reciclan en un porcentaje todavía bastante reducido a nivel mundial en comparación con otros materiales como el papel o el aluminio. Esto es debido a que sólo se pueden fundir los polímeros termoplásticos, además los plásticos ya utilizados pueden perder sus propiedades debido a la degradación que genera su uso o por la contaminación presente por los productos que contuvo.

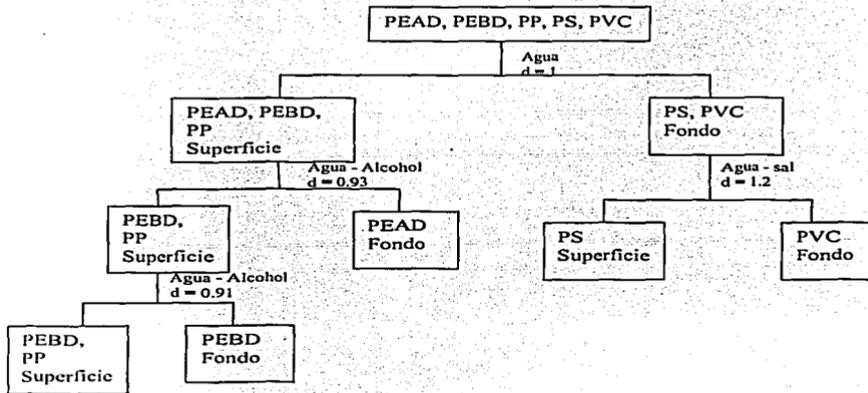


Figura28. Separación de mezclas de diferentes plásticos por el método de flotación – hundimiento

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



### *Reciclaje Secundario*

Este tipo de reciclaje convierte al plástico en artículos con propiedades diferentes inferiores a las del polímero original. Generalmente los plásticos que se recuperan de esta forma son los termoestables o los plásticos contaminados. Este tipo de plásticos pueden ser utilizados de nuevo si se les tritura y se utilizan como material de relleno.

### *Reciclaje Terciario*

En este tipo de reciclaje se degrada al polímero en compuestos químicos básicos y combustibles. Se trata de un tipo diferente de reciclaje a los dos primeros debido a que involucra un cambio químico y no sólo un cambio físico. Es un proceso en el cual las largas cadenas del polímero se rompen en monómeros o en monóxido de carbono e hidrógeno. Existen dos métodos principales: pirólisis y gasificación aunque también se han desarrollado otros métodos llamados metanólisis y glicólisis.

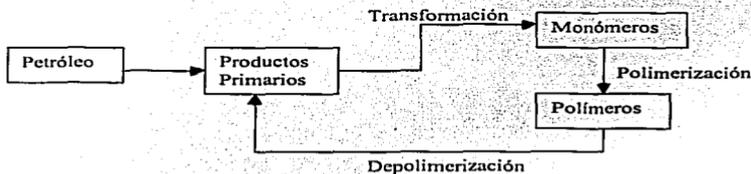


Figura 29. Regeneración de productos en el reciclado químico, reciclaje terciario

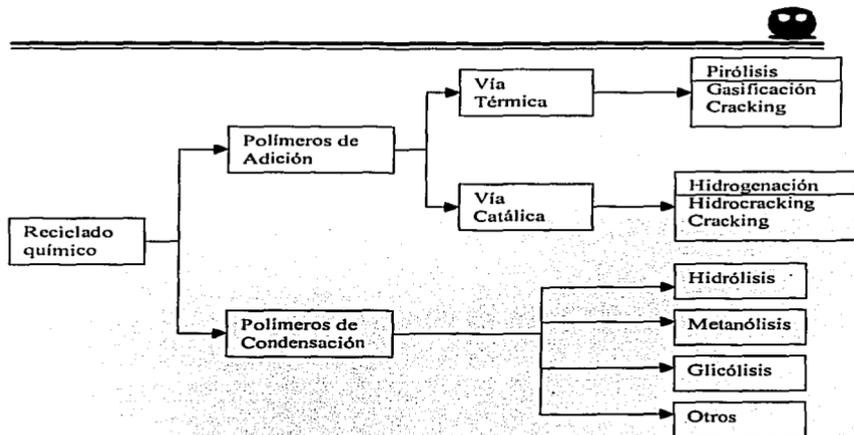


Figura 30. Procesos de reciclado químico

#### Reciclaje cuaternario

Consiste en el calentamiento del plástico con el objeto de usar la energía térmica liberada de este proceso para llevar a cabo otros procesos, es decir, el plástico se utiliza como combustible para reciclar energía.<sup>34</sup>

El reciclaje utiliza solamente de 10 a 15% de la energía necesaria para la refinación de petróleo y la manufactura de resinas vírgenes. Al hablar de ahorro de energía, la incineración de plásticos representa un método menos eficiente. Por ejemplo, 45.4 kg de polietileno de alta densidad tiene un valor calorífico de  $20 \times 10^6$  BTU (19 kJ), el reciclarlo representa el doble de ahorro

<sup>34</sup> <http://mailweb.udlap.mx/>

---



de energía,  $40 \times 10^6$  BTU (19kJ). Actualmente se utiliza el análisis del ciclo de vida para determinar el método más económico y aceptable para el ambiente en el uso de plásticos recuperados: reciclaje mecánico del plástico, depolimerización para producir monómeros o incineración para producir energía. La tecnología más aceptable depende del tipo de polímero, la industria local y las condiciones ambientales.<sup>35</sup>

### Análisis del Ciclo de Vida

Cuando se decide si un tratamiento es viable o no, se deben tener en cuenta no solamente las consideraciones económicas, sino también las ecológicas; por este motivo se debe analizar el impacto ambiental que produce el tratamiento seleccionado. Por ejemplo, al considerar el reciclado mecánico se deben de analizar las siguientes variables:

- Producto separado.
- Contaminación del material.
- Gasto de agua y contaminación por proceso de limpieza.
- Estado de deterioro del material.
- Propiedades mecánicas del producto reciclado.
- Costo del transporte.

<sup>35</sup> Kirk Othmer Enciclopedia of Chemical Technology, Supplement, p.461



De la misma manera, al considerar el reciclado químico se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Localización de la planta que suministrará el material.
- Volumen de residuos que se someterán al tratamiento.
- Balance económico de la operación de recuperación.

Para decidir la gestión correcta de los residuos plásticos se debe tomar en cuenta el impacto ambiental total que comprende todas las operaciones que se realicen para la recuperación, considerando los aspectos positivos y negativos. El análisis del ciclo de vida de un material (ACV) representa un balance de materia y energía que permite determinar el impacto ambiental de todas las etapas un proceso, de un producto o de ambos a la vez.<sup>36</sup> El ACV toma en cuenta una gran cantidad de variables como: consumo de materia prima, agua, energía, emisión de contaminantes, etc.

La determinación de este análisis permite la optimización de los recursos. La operatividad del ACV distingue para un producto en especial el ciclo de producción, el ciclo de uso y el ciclo de eliminación del residuo.

Para determinar el ciclo de vida de un material, primeramente se considera el sistema de producción como aislado. La metodología del ACV se compone de cuatro etapas fundamentales:

---

<sup>36</sup> Los plásticos y el tratamiento de sus residuos, p. 322

1. *Inicio.* La etapa de inicio es en la que se definen los objetivos para realizar un ACV, se definen también los límites del sistema, tomando una unidad funcional de producto sobre la que se realizará el trabajo. Esta unidad funcional representa la base de comparación, por ejemplo: una tonelada de producto, de detergente, o número de unidades fabricadas por KW. Los límites del sistema delimitan el campo de trabajo y deben estar definidos de acuerdo con los objetivos y la unidad funcional determinada.
2. *Inventario del sistema.* La etapa del inventario del sistema es aquella en la cual se recopilan datos de las materias primas utilizadas, la energía empleada y los residuos y emisiones generadas durante la vida del producto. El inventario del sistema se realiza registrando los flujos de entrada y salida de materia y energía desde la obtención de la materia prima hasta la eliminación del producto como residuo.
3. *Análisis del impacto o sensibilización.* Durante la etapa de análisis del impacto se evalúan los efectos causados por los flujos de cada una de las variables que se consideraron en la etapa de inventario. Este proceso se denomina análisis de sensibilización y se divide en tres fases diferentes:
  - Clasificación de los datos de las variables consideradas, los cuales se agrupan por categorías de impacto para reducir el número de variables a considerar.



- Caracterización de los grupos de variables para obtener un solo dato que se caracterice por el impacto ambiental.
  - Valoración de los datos resultantes de impacto ambiental asociado a cada categoría de impacto.
4. *Evaluación de las mejoras.* En la etapa de evaluación de las mejoras se analiza la valoración de los datos hecha en la etapa de inventario del sistema para ver en qué etapas puede haber mejoras. Para esto se toman en cuenta puntos como:
- Grupos de variables con mayor impacto.
  - Posibilidad de mejorar la variable.
  - Efectividad de la acción tomando en cuenta el impacto que genera.

#### Tecnologías para el reciclaje de resinas

Existen varias tecnologías para reciclar resinas homogéneas o mezclas de resinas plásticas:

- Reciclaje de resinas relativamente homogéneas (por ejemplo PET de botellas de refresco) que puede dar como resultado productos que compiten con resinas vírgenes. Este tipo de reciclaje ofrece el mayor potencial para reducir los requerimientos de manejo de residuos



plásticos, sin embargo, debe establecerse un sistema para captar y reciclar los productos los obtenidos.

- Reciclaje de mezclas de plásticos el cual usualmente da como resultado productos que compiten con materiales de bajo costo como la madera o el concreto. Esta técnica puede captar un mayor porcentaje de desechos plásticos ya que no es necesaria una separación de las resinas, sin embargo, a largo plazo los productos reciclados de desecho pueden tener el mismo problema de disposición de residuos.<sup>37</sup>

#### Clasificación de los desperdicios plásticos

De acuerdo a la fuente de donde provengan, se distinguen dos grupos de desperdicios:

- Desecho industrial: aquel que se separa antes de llegar a la basura, por ejemplo, piezas defectuosas y mermas de la industria. La ventaja de este tipo de desechos es que su recuperación es económica, práctica y permite que se utilicen de nuevo estos materiales.<sup>38</sup>
- Basura: Es todo objeto que ya no tiene uso o valor y necesita ser eliminado.<sup>39</sup>

<sup>37</sup> Plastic Wastes Management, Control, Recycling and Disposal, US EPA

<sup>38</sup> Enciclopedia del plástico 2000, p. 123

<sup>39</sup> Ibidem, p. 124



---

Existen varios sistemas utilizados actualmente para el tratamiento de residuos sólidos los cuales ayudan para evitar enfermedades provocadas por la contaminación que esta genera. Para procurar aprovechar al máximo se aplican técnicas para selección de residuos como:

- Acopio y selección.
- Pepena.<sup>40</sup>
- Recolección de desperdicios.
- Composteo.

Dentro de estas técnicas, es muy importante conocer la de pepena, que es una técnica que se da en mayor magnitud en países en vías de desarrollo. Se trata de un sistema de clasificación manual de la basura. Se realiza en los tiraderos a cielo abierto y requiere equipos de recolección como camiones que no compacten la basura, ya que esta se seleccionará una vez llegada al tiradero a cielo abierto.

La pepena no es una técnica eficiente ya que, en México por ejemplo, el 30% de la basura se queda en barrancas, ríos y calles, y el 70% en tiraderos. Con esta técnica sólo se aprovecha el 40% ya que el otro 30% no se puede separar por ser productos perecederos.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Idem

<sup>41</sup> Idem



---

Es importante también hablar sobre la recolección de desperdicios, esta técnica generalmente utilizada por empresas privadas nacionales, es muy eficiente ya que la separación de los residuos es más exhaustiva. A pesar de esto, existen problemas como el asegurar un abasto constante y consistente y la competencia tan elevada de la gente que se dedica a la pepena que ya está organizada y muchas veces llega a crear una mafia que no permite que los desperdicios sean recolectados.

#### Fuentes de residuos sólidos

- 1) Hogar: Los residuos plásticos que se encuentran en un hogar incluyen películas de empaque, envases de todo tipo de bebidas, de detergentes, de aceites, etc.; todos estos artículos generan el 60% del total de desperdicios en México.<sup>42</sup> Debido a que van directamente a la basura, estos desperdicios se contaminan, lo que provoca que posteriormente deban ser lavados para su reciclaje.
- 2) Comercio: Esta categoría incluye tiendas, supermercados, cines, restaurantes y centros comerciales y contribuye con el 10% del total de desperdicios.
- 3) Industria: Se cuentan en esta categoría las industrias de alimentos, cosméticos y productos de limpieza, que generan una gran cantidad de desechos derivados del empaque de sus productos, contribuyendo con el 10% del total de desperdicios.

---

<sup>42</sup> Ibidem, p. 126

- 4) **Industria de la transformación:** Los procesos en estas industrias generan piezas defectuosas y purgas por cambio de material. Este tipo de industrias generan el 15% del total.
- 5) **Fabricantes de materia prima:** Generan el 5% del total de desperdicios por los materiales de purga y limpieza.



Figura 31. Diferentes fuentes de desperdicios plásticos<sup>43</sup>

#### Variables determinantes en el reciclado

El reciclado de plásticos no es una tarea fácil ya que en muchos países no existe una cultura ecológica. Países como Alemania, Japón y Estados Unidos encuentran una oportunidad de negocio en el reciclaje, sin embargo, países en desarrollo como México y en general América Latina apenas comienzan a realizar esfuerzos para reciclar. La factibilidad del reciclaje en este tipo de

<sup>43</sup> Idem



---

países se basa en cinco aspectos principales: abasto, liquidez, mercado, productividad y tecnología.

El abasto debe ser constante y clasificado, y se debe de contar con espacio suficiente para resguardar los materiales. La empresa que se dedicará a reciclar debe contar con la liquidez necesaria para asegurar que el abasto no será suspendido. Se deben de tomar en cuenta los requerimientos del mercado para asegurar que el producto reciclado será competitivo. Asimismo se debe invertir en tecnología de vanguardia para que ni la calidad ni la productividad de la empresa se vean comprometidas.

#### Las cuatro R's

Finalmente existen cuatro acciones (generalmente llamadas las cuatro R's) que se pueden seguir para cuando se presente un problema de escasez generado por los materiales que tienen una vida útil corta:

- Reducir. Utilizar la menor cantidad posible de materiales que se vayan a desechar.
- Reutilizar. Aprovechar al máximo la vida útil de los productos a través de sistemas que permitan el retorno.
- Reciclar. Una vez que los productos no pueden utilizarse para su objetivo inicial, se obtiene a partir de ellos materia prima que se utilizará para fabricar artículos útiles para una segunda aplicación.



- 
- **Recuperar o Retornar.** Utilizar métodos químicos para obtener materias primas o energía a partir de desechos plásticos.



---

# CAPÍTULO VI

## RECICLAJE DE PET



## RECICLAJE DE PET

En Estados Unidos aproximadamente el 42%<sup>44</sup> del PET producido se recicla. El reciclaje de PET es uno de los ejemplos más exitosos y de mayor uso de reciclaje de polímeros, esto es debido a que el PET post-consumo es utilizado ampliamente sobre todo en la industria de las bebidas, el suministro generalmente tiene un volumen consistente y su valor una vez triturado es el segundo más importante después del aluminio.

El peso molecular promedio de las resinas PET se representa generalmente con la viscosidad intrínseca (VI) que es una medida de viscosidad de solución diluida (en una mezcla de fenol - tetracloroetano) con unidades dl / g. En la siguiente tabla se muestran las VI requeridas para cada área.

| Aplicación                       | Viscosidad<br>Intrínseca |
|----------------------------------|--------------------------|
| Cinta para grabar                | 0.60                     |
| Fibras                           | 0.65                     |
| Botellas de bebidas carbonatadas | 0.73-0.80                |
| Cuerda industrial                | 0.85                     |

Tabla 7. Viscosidad intrínseca necesaria por área de aplicación

Las botellas de PET post-consumo generalmente son separadas en un lugar de recuperación de materiales y comprimidas. Después se lavan y se convierten en hojuelas limpias, la naturaleza química del PET permite que se recicle de distintas formas, ya sea por procesos mecánicos o químicos.

<sup>44</sup> Polymer Recycling, p.125



---

El PET captado para el reciclaje debe ser limpiado primeramente, el procedimiento de limpieza comprende etapas de lavado, enjuagado y secado. El PVC es una de las impurezas más frecuentes en el PET, debido a que el PET y el PVC tienen valores muy similares de densidad. Al fundir PET que contenga este tipo de impurezas se forman manchas negras durante la producción de nuevas botellas.

### Barreras para el reciclaje de PET

1. Cuando el PET reciclado se utiliza para aplicaciones “no tradicionales”, debe competir con resinas de más bajo costo.
2. Las trazas de adhesivos causan que el PET se decolore y pierda claridad.
3. El PET que contiene humedad residual se degrada rápidamente cuando vuelve a procesarse.
4. Los productos de degradación térmica y oxidativa causan amarillamiento y disminuyen las propiedades mecánicas del PET
5. Debido a que requiere un manejo y un secado especial, el PET no puede utilizarse en extrusores de lámina ni en máquinas para moldeo por soplado.



---

El PET reciclado debe llenar los siguientes requisitos para ser utilizado en aplicaciones de alto valor:

- (i) Las hojuelas de PET deben estar separadas por color
- (ii) La viscosidad intrínseca debe mantenerse cercana a los valores originales
- (iii) La contaminación por PVC, papel, pegamento y polvo debe ser mínima
- (iv) La cantidad en cada lote que se vaya a reciclar debe ser constante

#### Problemas de Contaminación

El uso que se le dé al PET reciclado es lo que determina los requerimientos de pureza de la alimentación. Generalmente no se tolera la contaminación en aplicaciones de fibra o de botellas debido a los problemas de rompimiento de fibra que genera y a las consideraciones estéticas.

La presencia de contaminantes que generan compuestos ácidos cuando se encuentran sometidos a las altas temperaturas del proceso de extrusión es uno de los mayores problemas al reprocesar el PET ya que las reacciones de rompimiento de cadena son catalizadas por los ácidos.

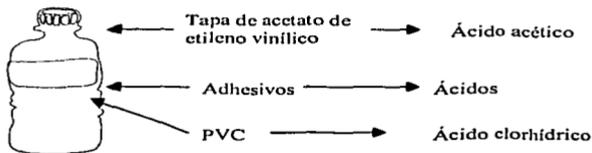


Figura 32. Contaminantes que generan compuestos ácidos

Los sellos de PVC que se encuentran en las tapas de las botellas son particularmente problemáticos ya que después de la trituración los fragmentos de PVC son muy difíciles de separar, ya que el PVC y el PET tienen una densidad muy parecida. Si existen niveles de PVC mayores a 1 ppm<sup>45</sup> el PET puede decolorarse.

La contaminación por humedad en el PET debe ser menor al 0.02% para evitar la reducción del peso molecular por hidrólisis. Cualquier rastro de humedad que no haya sido evaporada antes de fundir al PET reacciona rápidamente, una muy pequeña cantidad de humedad puede reducir la viscosidad a un nivel en el cual no sea posible moldear por soplado una botella.

Las etiquetas de papel representan un problema si se desintegran durante el lavado. Los fragmentos resultantes de papel pueden liberar fibras celulósicas que son difíciles de remover del polímero reprocesado. También los adhesivos utilizados para colocar las etiquetas representan un inconveniente, la mayoría no son solubles en agua por lo que pueden quedar pequeñas trazas del adhesivo aún después del lavado.

<sup>45</sup> Ibidem, p. 128

---



Otros tipos de contaminación incluyen: colorantes, tintas, partículas como papel, vidrio o polvo, contaminación por utilizar las botellas para otros usos (almacenamiento de pesticidas, combustible o detergente) y sobre todo contaminación por existencia de acetaldehído. El acetaldehído es un producto de degradación del PET, se forma por la tautomerización del alcohol vinílico que es producido por la recombinación del éster vinílico y los grupos hidroxilo.

El PET debe ser separado al comenzar el proceso de reciclaje, para esto se utiliza un baño de agua que separa basándose en las diferentes densidades de los plásticos. El PET junto con el PVC se hunden y los otros componentes de las botellas como PEAD, polipropileno y EVA flotan. Al reciclar el PET se deben remover los remanentes de papel, pegamento e impurezas. Las etiquetas de papel pueden ser removidas por clasificación con aire y por lavado con agua. El pegamento residual se debe remover por lavado ya que pequeñas trazas pueden dar un color café al polímero, mientras que las partículas como polvo, aluminio y papel dan una apariencia manchada. El PET reciclado de apariencia clara tiene un gran valor en el mercado por lo que se procura evitar cualquier tipo de cambio en la coloración, para esto generalmente el PET se separa para evitar impurezas de color.

El PET puede ser lavado con agua, este proceso consiste de dos etapas, una etapa de lavado con agua caliente con un 2% de NaOH y detergente a una temperatura de 80°C y después un lavado con agua fría. Es de suma importancia que después del lavado el polímero se seque, el PET debe tener menos del 0.02% de agua ya que como se mencionó anteriormente la humedad residual causa degradación hidrolítica durante las siguientes etapas a



---

altas temperaturas de fabricación como extrusión y termoformado. Para el proceso de lavado también pueden utilizarse solventes para remover los adhesivos que no se disuelven en el lavado convencional con agua. Los disolventes más comúnmente utilizados son el tetracloroetileno y el hexano.

#### Purificación por disolución y precipitación

Se puede purificar el PET de botellas de post consumo al disolverlo en solventes adecuados (ácido benzoico, mezcla fenol / tetracloroetano u o-clorofenol) después de esto se precipita el polímero puro en metanol. Una vez aislado el polímero puede someterse a policondensación en estado sólido para aumentar su peso molecular.

#### Reciclaje físico

Las hojuelas de PET pueden reprocesarse para obtener gránulos por medio de una extrusión por fusión. Este tipo de reproceso tiene el inconveniente de que si se encuentran trazas de agua o impurezas ácidas se inducen procesos de ruptura de cadena que provocan reducción en el peso molecular de la resina reciclada.

#### *Ventajas*

- Comparado con el reciclaje por quimólisis, el reciclaje mecánico por reproceso de fundición es relativamente sencillo, requiere poca inversión, utiliza equipo ya establecido, es flexible en cuanto al volumen de la alimentación y tiene poco impacto negativo en el ambiente



---

### *Desventajas*

- El mayor problema al reprocesar por fundición es la reducción en la viscosidad intrínseca, esto es causado por la degradación térmica e hidrolítica
- El reproceso por fusión puede generar oligómeros cíclicos y lineales los cuales pueden afectar las propiedades finales del producto
- Este tipo de proceso lleva a una velocidad de cristalización mayor
- Los contaminantes como PVC, PVDC, pegamentos, EVA, papel y otros generan compuestos ácidos los cuales catalizan la hidrólisis de los enlaces éster del PET durante el reproceso térmico
- Otro gran problema al reciclar el PET post-consumo es que el polímero se vuelve amarillo. Este color se debe a las reacciones intramoleculares de entrecruzamiento y oxidación.

### Propiedades del PET reciclado

Las diferencias entre las propiedades del PET reciclado mecánicamente y el PET 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 de color y de acetaldehído.

| Propiedad                            | PET    | PET       |
|--------------------------------------|--------|-----------|
|                                      | virgen | reciclado |
| Módulo de Young (MPa)                | 1890   | 1630      |
| Fuerza de tensión a la ruptura (MPa) | 47     | 24        |
| Elongación a la ruptura (%)          | 3.2    | 110       |
| Fuerza de Impacto (J/m)              | 12     | 20        |

Tabla 8. Comparación de las propiedades del PET virgen y el reciclado

El margen de 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 con la presencia de material heterogéneo como partículas de polvo que favorecen la nucleación.

Debido a que la mayor área superficial específica de las hojuelas permite absorber mayor cantidad de humedad, el efecto de la hidrólisis es más severo para el reciclado que para el material virgen.

#### Aplicaciones para el PET reciclado mecánicamente

El mercado para el PET reciclado se puede dividir en dos áreas principales

- 1) materiales con peso molecular relativamente alto ( $VI > 0.65$ )
- 2) materiales con un bajo peso molecular ( $VI < 0.6$ )

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### *Aplicaciones en Fibras y alimentos*

Para fibras de unión se utiliza PET post-consumo reciclado de alta calidad con una viscosidad intrínseca de 0.7 aproximadamente. Puede utilizarse para filamentos sin embargo, no es muy utilizado ya que la presencia de partículas contaminantes pueden causar rupturas. Para fibra no tramada como filtros, absorbentes o equipo para acampar; relleno de fibra para almohadas o edredones; tapetes para lo cual se mezcla con PEBD reciclado; charolas, película que pueda estar en con alimentos, contenedores para detergentes, resinas para ingeniería para producir partes de automóviles, computadoras y mobiliario.



Figura 33. Uso de PET reciclado para fabricar fibras



Figura34. Uso de PET reciclado para aplicaciones en contacto con alimentos

En los últimos años se han realizado muchos esfuerzos para obtener aprobación para el uso de PET para aplicaciones alimenticias. La FDA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

preparó los lineamientos que controlan el uso del PET reciclado para el contacto con alimentos. Los procesos de reciclaje se dividieron en tres clases: reciclaje primario como el reuso del desecho de plantas que no haya tenido contacto de consumo, reciclaje secundario que involucra el reprocesamiento de plástico post-consumo y reciclaje terciario que involucra depolimerización química.

Una de las primeras aplicaciones para contacto con alimento de PET reciclado fue un empaque con una capa encapsulada del material reciclado mecánicamente. Después de esto se sancionó a los productores de botellas para jugo y otros alimentos por utilizar cinco capas de preformas. Recientemente se otorgó una carta de no objeción contra el uso de botellas multicapas que incorporaran PET reciclado para alimentos acuosos y ácidos

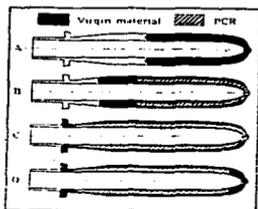


Figura 35. Moldeo de botellas multicapas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

### Reciclaje químico (quimólisis)

El reciclaje químico del PET permite que se remueva cualquier contaminante unido a la cadena polimérica por medio de la purificación de los monómeros y oligómeros. Este tipo de reciclaje puede dar como resultado la depolimerización total de los monómeros o la depolimerización parcial de los oligómeros.

Los agentes químicos que pueden utilizarse para depolimerizar el PET incluyen agua (hidrólisis), metanol (metanólisis), etilenglicol o dietilenglicol (glicólisis) y butanediol (diólisis), se utilizan catalizadores básicos para promover la hidrólisis. Después de la depolimerización, los monómeros y / u oligómeros se recuperan, algunas veces se purifican por destilación a vacío y se repolimerizan con etilenglicol para dar PET virgen.

Comercialmente se utilizan dos tecnologías de reciclaje terciario de PET: metanólisis y glicólisis. Estas dos técnicas rompen las uniones de los ésteres en los polímeros y forman monómeros. La técnica de metanólisis utiliza metanol para romper las uniones entre ésteres y producir cantidades estequiométricas de tereftalato de dimetilo y etilenglicol, este último se separa y purifica por destilación, se forman hidroxietiltereftalato y algunos oligómeros. Estos se recuperan y purifican por destilación en vacío y después se polimerizan en presencia de etilenglicol para formar de nuevo PET.

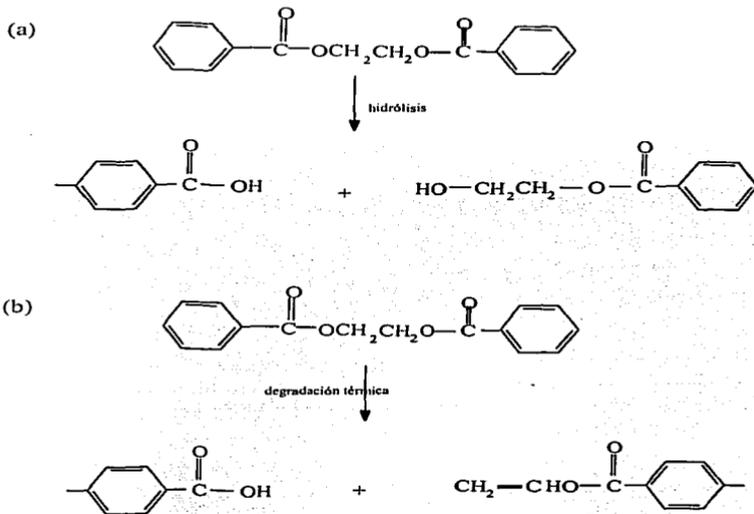


Figura 36. Reacciones primarias de reducción en el peso molecular durante el reprocesamiento del PET: (a) rompimiento hidrolítico del enlace éster para dar un grupo ácido carboxílico y un grupo hidroxil-éster; (b) rompimiento térmico del enlace éster para dar un grupo ácido carboxílico y un grupo vinil éster.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### Desventajas del Reciclaje Químico

- A pesar de que puede utilizarse en aplicaciones que estén en contacto directo con alimentos, no hay incentivo económico para utilizar ese PET reciclado químicamente si su precio es mayor que el del PET virgen. El gasto relativo depende del costo de la materia prima, inversión de capital y escala de operación.
- El PET reciclado contiene un número de comonómeros además de ácido tereftálico y etilenglicol los cuales incrementan la heterogeneidad química del material reciclado.
- Se ha calculado que para que las instalaciones para depolimerización de PET sean rentables se requiere una producción mínima de  $1.5 \times 10^4$  toneladas por año.

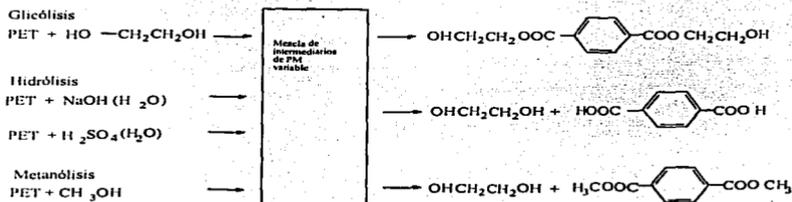


Figura 37. Procesos de reciclaje químico

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



| Grado de Contaminación | Ejemplo de alimentación                | Proceso de recuperación | Complejidad del proceso |
|------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| Bajo                   | Botellas transparentes de PET          | Fundición               | Sencilla                |
| Medio                  | Botellas de color de PET               | Metanólisis             | Alta                    |
| Medio                  | Botellas sucias                        | Glicólisis-hidrólisis   | Alta                    |
| Medio                  | Película                               | Glicólisis parcial      | Alta                    |
| Medio                  | Película                               | Recuperación de AT y EG | Alta                    |
| Medio                  | Desecho de fibra                       | Glicólisis              | Alta                    |
| Alto                   | Laminados, película delgada recubierta | Recuperación energética | Sencilla                |

Tabla 9. Recuperación de PET por diversos procesos

| Proceso            | Calidad de la Alimentación | Producto Intermediario | Inversión | Costos de Conversión |
|--------------------|----------------------------|------------------------|-----------|----------------------|
| Glicólisis         | Alta                       | Oligómeros             | Alta      | Altos                |
| Glicólisis Parcial | Baja                       | AT                     | Muy alta  | Muy altos            |
| Metanólisis        | Baja                       | DMT + EG               | Muy alta  | Muy altos            |
| Quimólisis híbrida | Baja                       | AT + EG                | Muy alta  | Muy altos            |
| Multicapas         | Alta                       | Hojuelas de polímero   | Alta      | Promedio             |

Tabla 10. Magnitud del costo de conversión por proceso



---

## Glicólisis

El proceso de glicólisis de PET se lleva a cabo a presión a temperaturas entre  $180^{\circ}$  -  $220^{\circ}$  C para obtener BHET (tereftalato de bis-(hidroxietil)). Esta reacción generalmente se lleva a cabo en una atmósfera inerte ( $N_2$  por ejemplo) para evitar la oxidación de los polioles producidos.

La reacción de glicólisis da los monómeros “verdaderos” de la condensación del poliéster, es decir bis-hidroxi-etiltereftalato (BHET), junto con los oligómeros respectivos. El BHET no se purifica fácilmente por destilación ya que se trata de un sólido con consistencia de cera con un punto de fusión relativamente alto. Para purificar esta sustancia se filtra bajo presión para remover las impurezas físicas, después se trata con carbón activado para evitar la presencia de las impurezas responsables de cambios en la coloración y de la degradación oxidativa.

### *Ventajas*

- El proceso puede integrarse fácilmente en una planta convencional de producción de PET y el BHET recuperado puede mezclarse con el BHET virgen.

### *Desventajas*

- La glicólisis es solamente una depolimerización parcial para dar BHET intermedio por lo que el proceso no remueve colorantes o tintes
- La glicólisis no es útil para remover bajos niveles de copolímeros



- El proceso no lleva a la formación de especies químicas discretas sino que da BHET junto con oligómeros de alto peso molecular. Además la mezcla de reacción obtenida por este proceso es difícil de purificar por las técnicas convencionales como cristalización y destilación.
- Este proceso es más adecuado para la recuperación de desechos post-industriales, generalmente se prefiere utilizar este proceso cuando la alimentación de PET es de composición conocida y alta calidad.

### Metanólisis

Se trata solamente de una alcoholisis de PET que resulta en la formación estequiométrica de DMT y EG. El proceso se lleva a cabo en dos etapas: primero el PET se disuelve y se somete a una glicólisis parcial seguida por una metanólisis para dar DMT y EG. El DMT resultante se purifica por cristalización y destilación. La destilación remueve todos los contaminantes físicos y da un material de alta pureza. Este proceso se utiliza con éxito para PET de desecho, las alimentaciones más comunes incluyen películas usadas, desecho de planta, desecho de fibra y botellas de desecho.

### *Ventajas*

- Debido a que es más fácil purificar el DMT que el BHET, este proceso puede aceptar una alimentación de más baja calidad que la que se suministra en el proceso de glicólisis
- El DMT derivado de contenedores post-consumo de bebidas tiene una calidad idéntica al DMT virgen



- El EG y el metanol se recuperan y reciclan fácilmente
- La metanólisis puede convertir botellas verdes de PET en DMT y ED (etano diol) para producir PET nuevo y limpio

### *Desventajas*

- El costo del proceso es mayor que el costo de glicólisis, sin embargo, debido a que este proceso tolera mayor cantidad de contaminación, los altos costos de proceso se compensan con bajos costos de materia prima
- Los productos de reacción comprenden una mezcla de glicoles, alcoholes y derivados ftalato. El proceso de separación y preparación de estas sustancias es relativamente alto. Además del DMT, se deben recuperar los productos como metanol, ED, DEG y CHDM (1,4-ciclohexano dimetanol) para que el proceso sea económico, y las corrientes de desecho de catalizadores, colorantes y contaminantes deben eliminarse
- El proceso puede tolerar un gran rango de contaminantes, aún así, el agua altera el proceso envenenando al catalizador y formando azeótropos y además dificulta la separación del producto de reacción
- El producto principal de este proceso es DMT pero generalmente la producción de PET se basa en AT purificado. La conversión de PET post-consumo en DMT seguida de la hidrólisis para dar AT aumenta el costo del proceso de metanólisis. Actualmente el proceso de



metanólisis no es competitivo comparado con el proceso de producción de DMT virgen, de hecho, el costo del DMT obtenido por metanólisis es el doble del DMT virgen

- La principal dificultad para el proceso de metanólisis es obtener la cantidad suficiente de botellas de PET para permitir un proceso continuo de conversión y justificar la gran inversión de capital que requiere una planta en operación.

### Hidrólisis

Este proceso se basa en el uso de altas presiones y temperaturas para depolimerizar el PET en ácido tereftálico y etilenglicol. La hidrólisis no es muy utilizada comercialmente para producir PET reciclado para contacto con comida debido a los costos asociados con la purificación del AT reciclado.

La hidrólisis del PET con agua puede ser catalizada por ácidos (con ácidos minerales) o catalizada con bases (con NaOH). El producto de hidrólisis conocido como AT crudo se trata con carbón activado para remover impurezas cromofóricas y después es purificado por recristalización para dar AT refinado que tiene una pureza comparable a la del AT comercial.

### *Ventajas*

- Los procesos de hidrólisis pueden manejar una alimentación de PET con un 40% en peso de contaminación



---

### *Desventajas*

- La economía del proceso depende de la escala, pureza y mercado de los productos finales
- Es difícil purificar el AT de la mezcla de reacción ya que tiene una baja solubilidad y una baja presión de vapor. Para obtener AT de una pureza razonable para utilizarlo directamente para síntesis de PET, se debe cristalizar varias veces.
- Las reacciones de depolimerización que emplean NaOH deben neutralizarse con un ácido mineral fuerte (ácido sulfúrico) para liberar el AT sólido. Esta etapa produce grandes cantidades de residuo de neutralización para el cual se necesita encontrar un uso comercial. Existe también el riesgo de que exista contaminación del polímero con iones metálicos alcalinos (sodio o potasio)
- Comparado con los procesos de glicólisis y metanólisis la depolimerización hidrolítica del PET es un proceso lento.



## Procesos híbridos (glicólisis – hidrólisis)

Este proceso tiene la ventaja de que puede aceptar plástico contaminado y convertirlo, por medio de una combinación de glicólisis e hidrólisis, en PET de alta calidad adecuado para uso en aplicaciones alimenticias. En la siguiente figura se muestra el proceso.

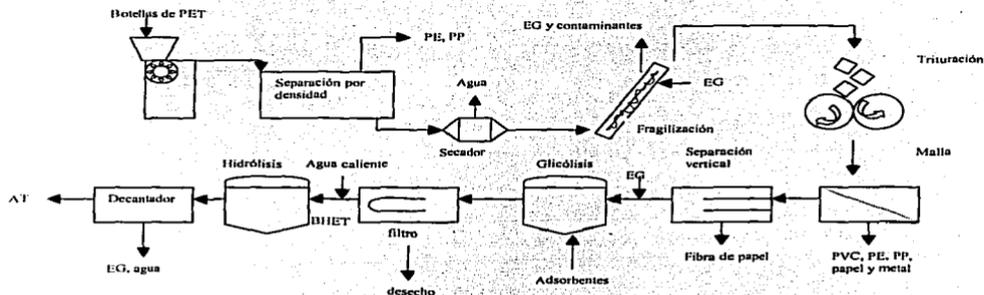


Figura 38. Diagrama de un proceso híbrido de reciclaje de PET<sup>46</sup>

El primer paso es la trituración del PET en el lugar de recolección, esto elimina la necesidad de separación y permite que las cargas para transporte sean mayores para reducir el costo.

Las hojuelas se lavan en un tanque de flotación en el cual se remueven el papel y las poliolefinas. El PET se seca en un hidrociclón y después de

<sup>46</sup> Polymer recycling, p. 130



---

depolimeriza parcialmente por una reacción de transesterificación con etanodiol hirviendo para transformar al PET a un estado frágil.

Las hojuelas frágiles se pasan por rodillos de acero para triturarlas y volverlas partículas de un tamaño menor a 1 mm, después son pasadas por una malla para separar papel, PVC, fragmentos de aluminio y plásticos solidificados. Posteriormente el PET se separa de contaminantes adherentes por un proceso de separación vertical que remueve las pequeñas partículas como fibras de papel y pegamento.

El PET limpio se depolimeriza por glicólisis para dar bis(hidroxietyl) tereftalato el cual es tratado con adsorbentes (carbón activado y barro) para remover partículas de color y algunos compuestos orgánicos, y filtrado para remover partículas más pequeñas.

El BHET purificado se hidroliza en un reactor a 200 °C y el AT resultante se recupera del agua hirviendo mientras que las impurezas químicas como los ácidos del nylon, proteínas y productos de degradación del PET permanecen disueltos.

El ED es recuperado, purificado por destilación y después mezclado con el AT y esterificado para dar BHET. El BHET puede ser repolimerizado para producir PET de alto grado.



---

### *Ventajas de la quimólisis híbrida*

Sólo se alimenta ED y agua al sistema por lo que no es necesario añadir reactivos o químicos adicionales, ni necesitan ser removidos al final. Esto disminuye costos y permite la producción de un PET de más alta pureza, de hecho el PET obtenido por este proceso tiene la misma cantidad de impurezas que el PET virgen.

Las hojuelas contienen ya un catalizador para el paso de transesterificación llamado glicolato de antimonio. El nivel de catalizador es el adecuado para la etapa de fragilización, no es necesario añadir catalizador para el paso de hidrólisis ya que la reacción se cataliza con el producto, AT.

El proceso remueve de manera efectiva los contaminantes citados por la FDA: cloroformo, lindano, tolueno y metil arsenato monosódico. En la primera etapa, el lavado con agua remueve el arsenato que es soluble. Después un lavado a contracorriente con ED hirviendo evapora el cloroformo y el tolueno y descompone al lindano. Posteriormente, la hidrólisis a alta temperatura y el lavado a 100° C convierte cualquier contaminante residual en moléculas pequeñas solubles en agua.

El proceso trata varios tipos de contaminantes plásticos que entren en el proceso. Por ejemplo, el PE y PP son removidos durante la etapa de flotación y en los rodillos de acero porque las pequeñas hojuelas de estos materiales se eliminan a través de las mallas. Los polímeros con densidades  $> 1 \text{ g/cm}^3$  que no tienen grupos ester o amida en la cadena principal (PS, PVC, PMMA) no son depolimerizados químicamente y permanecen como partículas grandes



---

que pueden removerse por tamizado. Las poliamidas como el nylon se hidrolizan para dar aminas solubles en agua y los ácidos permanecen en solución, mientras que el AT es insoluble. Los policarbonatos se depolimerizan en ED hirviendo y se hidrolizan a bisfenol A y dióxido de carbono. Los pedazos de papel no son afectados por el ED caliente y emergen sin cambio de los rodillos. Se separan por tamizado, mientras que las fibras celulósicas restantes se hidrolizan para dar productos solubles.

El pegamento de la etiqueta se desprende del PET utilizando el ED hirviendo. Una parte del pegamento se funde, pero la mayor parte permanece pegada al papel. Todas las partículas pequeñas de pegamento se remueven durante el proceso de separación vertical. Los contaminantes densos como fragmentos de aluminio, arena, polvo y vidrio se remueven en una de las siguientes tres etapas: los fragmentos grandes se tamizan; los gránulos de tamaño similar al PET por separación vertical y las partículas finas por filtración a alta presión.

Los modificadores que se añaden al PET comercial se remueven también por este proceso híbrido. El ácido isoftálico (IPA) es soluble en agua hirviendo y se recupera en el líquido sobrenadante. Al enfriar este líquido, el IPA cristaliza y se filtra. El dimetanol ciclohexano se concentra en el residuo después de destilar el agua y ED del licor de hidrólisis. El dietilén glicol y los glicoles de alto peso se hidrolizan por las condiciones ácidas a 200°C y producen ED.

Los pigmentos de las etiquetas se liberan de los aglomerantes bajo la acción del ED hirviendo y se suspenden en el contraflujo de ED durante la etapa de



---

fragilización. Los pigmentos en el polímero pueden ser adsorbidos de la solución de BHET utilizando carbón activado y barro.



---

# CAPÍTULO VII

## RECILAJE DE

## POLIETILENO



---

## RECICLAJE DE POLIETILENO

Aproximadamente el 24% del PEAD producido en los Estados Unidos se recicla,<sup>47</sup> principalmente botellas de agua o de leche y botellas de detergente líquido. En Alemania, más del 60%<sup>48</sup> de los desechos de empaques caseros consiste de poliolefinas, principalmente botellas de PEAD y película de PEBD. Después de las botellas de PET, los contenedores más reconocibles de plástico post-consumo son las botellas de leche o jugo fabricadas de polietileno de alta densidad y además son la segunda mayor fuente de plástico reciclado. El plástico reciclado de PEAD obtenido de botellas de jugo y leche tiene una gran demanda debido a que no contiene pigmentos.

En los inicios del reciclaje del polietileno se utilizaban cargas de plásticos post-consumo sin separar, en las cuales el componente principal era polietileno. El producto se extruía en grandes secciones, se caracterizaba por la presencia de contaminantes entre las capas (PET no fundido y fragmentos de aluminio) y por sus propiedades mecánicas de escasa calidad.

El PEAD proveniente de los contenedores de jugo se diseña para moldeo por soplado, por lo que tiene un alto peso molecular, esto provoca que no sea económicamente viable si el reciclado es por moldeo por inyección. Para superar esta y otras deficiencias se han desarrollado varias mezclas de PEAD reciclado con PE virgen.

---

<sup>47</sup> Polymer recycling, p. 156

<sup>48</sup> Idem



---

Las botellas de leche post-consumo llegan a la planta de reciclaje en forma compacta después de haber sido separadas de PET y otros plásticos vinílicos. Al llegar, la mayoría de las botellas tienen sus tapas, éstas también se consideran reciclables ya que representan aproximadamente el 10% del peso total, las botellas también pueden contener residuos de leche que puede ser removida por medio de un proceso de lavado. Pueden también llegar botellas de detergente, las cuales preferentemente deben reciclarse en otro proceso ya que generalmente tienen color.

Al igual que en el PET, el proceso de limpieza comprende el lavado, enjuagado y secado del plástico recuperado. El problema más grande en la limpieza es la remoción de etiquetas, para esto se utilizan detergentes. Las etiquetas formadas por hojas metálicas pueden introducir metales al polímero, cuando estas fueron selladas con calor la única manera de removerlas es utilizando un filtro de extrusión, esto causa que se saturen los filtros lo cual aumenta los costos de producción.

Las botellas se trituran para obtener pequeñas hojuelas, estas se transfieren a un tanque de flotación, en donde el PET y el PVC todavía presentes se hunden y se separan del producto. En este paso cualquier cosa que flote es un contaminante potencial (corchos, poliestireno, PP), la resina se seca y se introduce a un extrusor.<sup>49</sup>

#### Características del PEAD reciclado

Las ventajas de reciclar PEAD a partir de botellas de leche o de jugo son:

---

<sup>49</sup> Ibidem, p. 158



- Su forma altamente reconocible
- Su abundancia
- Su índice de fusión consistente
- Su capacidad potencial de dar un producto limpio y de color natural

El reciclado final tiene las mismas propiedades reológicas que la resina virgen ya que durante el proceso la resina no se somete a alguna degradación térmica apreciable.

Existen también algunos problemas que limitan el reciclado por ejemplo que la resina es un homopolímero y no tiene resistencia adecuada a rupturas por acción del ambiente lo cual hace que no sea adecuado para fabricar botellas de detergentes o blanqueadores y se ha encontrado que los productos fabricados por moldeo por inyección a partir de mezclar que contienen PEAD reciclado de resinas de botellas de leche muestran mayor tendencia a encogerse que los fabricados a partir de resina limpia.

#### Aplicaciones para el PEAD reciclado

El mercado de PEAD reciclado a partir de botellas de leche y jugo se limita generalmente a aplicaciones como productos de moldeo por soplado o por extrusión. El PEAD reciclado puede utilizarse para moldeo por inyección, sin embargo su alto peso molecular puede llevar a presiones de inyección altas y combaduras debido a una orientación excesiva. Este tipo de reciclado se ha



---

utilizado en aplicaciones como botellas de aceite para motor, bolsas de mercado, pipas de drenaje, bolsas de basura, etc.

Se han investigado varias mezclas de polietileno reciclado con polietileno virgen que satisfagan el desempeño mecánico requerido para artículos domésticos. Para satisfacer este criterio la mezcla no debe mostrar una reducción significativa en su fuerza de tensión o su resistencia al impacto comparada con el material virgen, y debe contener la mayor cantidad posible de reciclado. Tampoco debe tener una viscosidad mayor a la del material virgen, actualmente se utiliza un modificador de polietileno lineal de baja densidad con un índice de fusión de 20 el cual se utiliza para mejorar el flujo de la mezcla para facilitar el proceso. El PELBD también le da al reciclado dureza y resistencia a las rupturas por acción del ambiente. Esta mezcla se ha utilizado con éxito en basureros móviles, estos artículos pueden ser fabricados utilizando un proceso de moldeo estructural en espuma el cual hace que sean robustos y de peso ligero. En este proceso el polímero fundido se hace espuma con nitrógeno antes de ser moldeado por inyección para dar una pared con una estructura como de espuma y una superficie integral.

La mejor aplicación de PEAD reciclado son las botellas hechas por soplado para químicos domésticos o industriales como shampoo, detergente y jabones. La primera empresa en introducir una botella de PEAD 100% reciclado fue Procter and Gamble para su línea de suavizantes de telas. La mayoría de las botellas de detergente hechas de PEAD incluyen una capa de PEAD reciclado que se encuentra entre dos capas de PE virgen. Actualmente se han introducido nuevas resinas de polietileno de alto desempeño para compensar las deficiencias del PEAD reciclado. Esta estrategia incluye unir una mezcla



---

de PEAD reciclado con un PEAD con propiedades superiores de resistencia a rupturas por acción del ambiente para mejorar las propiedades del homopolímero reciclado y hacerlas comparables con las de un copolímero y así permitir la producción de botellas de detergente con una sola capa de polímero.

Otras aplicaciones del PEAD reciclado incluyen su uso en contenedores que tienen contacto con comida. La empresa Union Carbide fue la primera en recibir una autorización de la Administración de alimento y medicamentos de Estados Unidos para utilizar PEAD reciclado en botellas para empaque de comida deshidratada.<sup>50</sup> Existe un grado de polietileno conocido como DMDS-1200 NTP que puede utilizarse en empaques multicapas para comida deshidratada en los cuales la capa interna que tiene contacto con la comida es PEAD y tiene un grosor de por lo menos 100  $\mu\text{m}$ . Esta resina no puede utilizarse para aplicaciones de empaques de comida que contengan grasa superficial, sin embargo, puede utilizarse para productos de cuidado personal como lociones o cremas. Este grado de PEAD es desafortunadamente más caro que el PEAD virgen debido a las etapas de limpieza que se requieren.

El PEAD reciclado puede también ser utilizado para cestas contenedoras de botellas, para esta aplicación se debe mezclar con una proporción de PELBD. También se ha encontrado uso para el PEAD en la fabricación de kayaks, los cuales se hacen de PEAD 100% reciclado a partir de botellas de detergente. Las botellas recicladas de detergente sirven también para la fabricación de tubería para drenaje, las cuales contienen hasta un 75% en peso del reciclado. El PEAD reciclado puede también ser laminado para aplicarse en accesorios

---

<sup>50</sup> Ibidem, p. 161



como las bolsas de supermercado, bolsas para basura o películas para sobreenvoltura. El PEAD reciclado ha sido utilizado con éxito para la fabricación de estructuras como durmientes de ferrocarril, postes de cercas o postes para carreteras reemplazando algunas veces a la madera o el concreto, aún así no es muy adecuado para aplicaciones que requieran soportar cargas, sin embargo, se pueden utilizar aditivos como fibras de madera para reforzar el material.

### Contaminación más frecuente en el PEAD

En la siguiente tabla se enumeran los contaminantes más comunes encontrados al reciclar polietileno

| <b>Contaminante</b> | <b>Efecto en el producto reciclado o en el proceso</b>   |
|---------------------|--|
| Polipropileno       | Problemas en la laminación, debilitamiento en las líneas de soldadura, grumos sin fundir   |
| PET                 | Grumos sin fundir  |
| Fragmentos de metal | Catalizan la oxidación del polímero  |
| Fibras de papel     | Burbujas en las botellas hechas por soplado  |
| Polvo               | Geles, concentraciones de esfuerzo   |
| Pigmentos           | Variaciones no deseadas en el color  |
| Leche               | Olor rancio debido a productos de lipólisis de ácido butírico, plastificación del polímero que disminuye su fuerza contra impactos |
| Accite de Motor     | Problemas de olor residual   |
| Hidroperóxidos      | Reacciones de iniciación térmica y foto oxidativas   |



Tabla 11. Efecto de diferentes contaminantes en los procesos o productos del reciclaje<sup>51</sup>

Aún en los recipientes de recolección separada destinados solamente para botellas de PET y PEAD se ha encontrado que puede haber hasta un 15 ó 20% de contaminación debida a otros materiales. El polipropileno se encuentra debido a las tapas o a las botellas de PP que se confunden con las botellas de PEAD, esta contaminación no es fácilmente removida durante el proceso de flotación ya que los dos polímeros tienen una gravedad específica menor a la unidad. Debido al uso tan frecuente de botellas para bebidas carbonatadas, el PE puede encontrarse contaminado con PET en la etapa de recolección y separación, sin embargo, esto no representa un gran problema ya que estos polímeros son fácilmente separados por el método de flotación. Otros contaminantes incluyen adhesivos los cuales pueden mezclarse durante el reproceso y reducir las propiedades mecánicas del reciclado, papel el cual crea orificios y defectos superficiales, los contenidos de las botellas de PEAD, o los aditivos como pigmentos que generan un reciclado de color oscuro.

El reciclado de PEAD del grado utilizado para soplado debe purificarse de la contaminación de partículas, ya que estas pueden causar orificios durante el proceso de soplado. Los contaminantes sólidos pueden removerse en la fase de fundición por medio de una filtración. Un filtro de 180µm puede remover una cantidad considerable de contaminantes sólidos.

Se pueden reciclar también los contenedores de aceite para motor. Las botellas de PEAD se recolectan de las estaciones de servicio para minimizar la necesidad de separación, después se transportan a una planta de lavado en la

<sup>51</sup> Idem



cual se remueve el aceite, aún después de este lavado, las botellas pueden retener un 3% de aceite, que puede plastificar internamente al polímero.

Como efecto de el aceite residual, el índice de fusión aumenta a 0.4 g/10 min comparado con el 0.25 g/10 min del polímero original. El lavado con agua caliente a 80°C remueve más aceite, sin embargo, hay un costo extra que no está justificado. El olor tan fuerte de este aceite residual limita el uso del reciclado a la producción de nuevos contenedores de aceite para motor.<sup>52</sup>

Se han propuesto mezclas de PEAD y PET para aprovechar la disponibilidad de estos dos polímeros reciclados. Las mezclas pueden combinar la resistencia química del PEAD con las características de procesado del PET. Debido a que los dos polímeros son inmiscibles mutuamente, debe añadirse aproximadamente un 5% de compatibilizador a la mezcla fundida. Si se utilizan proporciones de 5 -15% de compatibilizador se producen polímeros más adecuados que el PET para moldeo y extrusión.<sup>53</sup>

Finalmente, se ha encontrado que el poder calorífico de el PEAD es de 46 MJ/Kg, un valor parecido al de los combustibles de gas natural, por lo cual la incineración es otra técnica utilizada de recuperación.

El PEBD se utiliza en aplicaciones en donde se requiere flexibilidad, barrera a la humedad y fácil procesamiento. El PEBD ha sido utilizado para moldeo de productos como madera plástica y tablas utilizadas en muebles para exteriores, también se utiliza en la fabricación de tapas para contenedores de reuso y anaqueles. El PEBD puede también triturarse y mezclarse con

<sup>52</sup> Ibidem, p. 159

<sup>53</sup> Kirk Othmer Enciclopedia of Chemical Technology. Supplement



cemento para crear concreto, sin embargo, la cantidad adicionada es baja (0-5% con respecto al cemento) y puede tener un efecto adverso en la fuerza de compresión del cemento.<sup>54</sup>

| <b>Propiedad</b>                                    | <b>PEAD</b>   | <b>PEAD</b>                |
|---|---------------|----------------------------|
|   | <b>Virgen</b> | <b>Reprocesado una vez</b> |
| Índice de fluidez g/10min                           | 0.77          | 0.79                       |
| Densidad g/cm <sup>3</sup>                          | 0.963         | 0.961                      |
| Módulo de flexión Kg/cm <sup>2</sup>                | 15,396        | 15,396                     |
| Resistencia al Impacto Kg.cm/cm                     | 13            | 9                          |
| Resistencia a Tensión de Ruptura kg/cm <sup>2</sup> | 155           | 175                        |
| Elongación  | 555           | 613                        |

Tabla 12. Comparación de propiedades del PEAD virgen y el reprocesado<sup>55</sup>

Aunque el reciclado del PEBD tiene un gran campo, no es tan extenso como el del PEAD. Una fuente muy significativa de PEBD reciclado proviene de película de recubrimiento utilizada para estabilizar cargas en las paletas de mezclado. Una importante característica de esta película es que no tiene pigmentos y puede ser utilizada en cualquier aplicación o producto que tenga color. Rubbermaid y McDonalds recolectan este tipo de películas, las hacen repelentes y la incorporan en productos de uso doméstico.

Se pueden también fabricar bolsas de basura con un 70 - 90% en peso de reciclado, que se distinguen de las hechas con resina virgen debido a su mayor

<sup>54</sup> Kirk Othmer Enciclopedia of Chemical Technology, Supplement

<sup>55</sup> Polymer Recycling, p. 158

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



grosor que tiene como finalidad compensar la baja resistencia mecánica causada por la contaminación del reciclado.

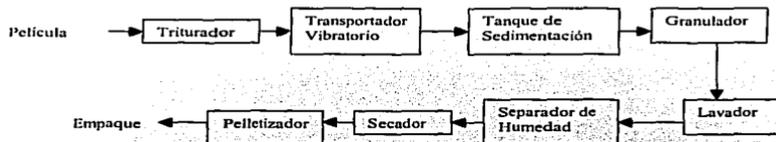


Figura 39. Diagrama de flujo del reciclaje de PEBD<sup>56</sup>.

El reciclado del PEBD es particularmente difícil por los niveles de contaminación que se encuentran en él, por ejemplo, el polvo que puede representar un 30 – 40% de contaminación y que además puede contener hasta un 3 % de hierro el cual es degradante del polietileno<sup>57</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>56</sup> Polymer Recycling, p. 160

<sup>57</sup> Idem



---

# CAPITULO VIII

## NORMAS



---

## NORMAS

De acuerdo con la ley mexicana existen dos tipos de normas, las Normas Emergentes y las Normas Oficiales Mexicanas.

Las Normas Emergentes (NMX) son expedidas por las autoridades para atender cuestiones de urgencia, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son de carácter voluntario, su finalidad es establecer las características y especificaciones que deben reunir los productos y procesos si llegan a representar algún riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud del ambiente en general y laboral, o para la preservación de los recursos naturales.

Las NOM contienen la denominación de la norma, su clave o código, su finalidad, la identificación del objeto de la norma, las especificaciones y características que correspondan al objeto de la norma en razón de su finalidad, los métodos de prueba y muestreo aplicables, los datos y demás información que debe contener el producto.

Para la elaboración de estas normas se toman como base las normas internacionales, a menos que estas seas ineficaces, inadecuadas para alcanzar los objetivos o sean inexistentes. Se debe tomar un consenso de los sectores interesados para que participen en un Comité y se sometan a una consulta pública por un período de 60 días antes de su expedición.



---

En México existen varias normas que regulan la emisión de residuos peligrosos:

- **NOM-CRP-001-ECOL/93**, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente
- **NOM-CRP-002-ECOL** que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente
- **NOM-CRP-004-ECOL** que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radiactivos
- **NOM-CRP-005-ECOL** que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos
- **NOM-CRP-006-ECOL/1993**, que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos
- **NOM-CRP-007-ECOL/1993** que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos



---

La NOM-CRP-001-ECOL/93 habla sobre las características que debe reunir un residuo para considerarse peligroso, en esta norma se establece un listado de los residuos que han sido clasificados como tales. El Anexo 2, título 7 habla sobre los materiales plásticos y resinas, enlista los residuos derivados del proceso de producción de resinas y plásticos (lodos residuales) como peligrosos, sin embargo, no especifica que los residuos post consumo de plásticos como PET y polietileno se consideren peligrosos.

#### Normas mexicanas en materia de plásticos

En México las normas mexicanas que hablan al respecto de reciclaje de plásticos son las siguientes:

- NMX-E-232-SCFI-1999 Industria del Plástico – Reciclado de Plásticos – Simbología para la Identificación del Material Constitutivo de Artículos de Plástico – Nomenclatura. En esta norma se establecen y describen los símbolos de identificación que deben portar los productos fabricados de plástico en cuanto a su material se refiere para facilitar su recolección, selección, separación, acopio, reciclado y/o reaprovechamiento. Se aplica a todos los productos fabricados de plástico que se comercializan en el territorio nacional y excluye a los artículos que debido a su tamaño no sea factible de incluirles el símbolo de reciclado de manera legible.
- NMX-E-060-1978 Terminología de plásticos. El objetivo de esta norma es establecer los términos relacionados con los plástico, uniformar la terminología utilizada, evitar la ocurrencia de más de un término dado a los plásticos y evitar dar una doble significación para términos particulares.



---

## Legislación mexicana en materia de reciclaje

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente contiene las acciones y artículos más actualizados que norman directamente el reciclaje de los residuos sólidos.

En el Capítulo II titulado *Distribución de Competencias y Coordinación*, el artículo 5° lista entre las facultades de la federación:

XII.-La regulación de la contaminación de la atmósfera, proveniente de todo tipo de fuentes emisoras, así como la prevención y el control en zonas o en caso de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;

XIII.- El fomento de la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios; así como el establecimiento de las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos.

El Capítulo III titulado *Política Ambiental* en el artículo 15° llama la atención al hecho de que no sólo las autoridades sino también los particulares tienen la responsabilidad de proteger el equilibrio ecológico. Habla de la obligación que tienen los sujetos responsables de la contaminación de prevenir, minimizar o reparar los daños que causen, y asumir los costos que esto implique. Propone como obligación el hecho de motivar a los sujetos que protejan al ambiente y a quienes tengan un aprovechamiento sustentable de los recursos.



---

En el Capítulo IV, *Instrumentos de la Política Ambiental*, la Sección I, *Planeación Ambiental*, dicta en su capítulo 18° :

**ARTICULO 18.-** El Gobierno Federal promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de los programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, según lo establecido en esta Ley y las demás aplicables.

La Sección III, *Instrumentos Económicos* dicta que todos los Estados, la Federación y el Distrito Federal deben incentivar la observación de la Política Ambiental por medio del diseño, desarrollo y aplicación de instrumentos económicos. Los objetivos de la aplicación de estos instrumentos buscan:

I.- Promover un cambio en la conducta de las personas que realicen actividades industriales, comerciales y de servicios, de tal manera que sus intereses sean compatibles con los intereses colectivos de protección ambiental y de desarrollo sustentable;

II.- Fomentar la incorporación de información confiable y suficiente sobre las consecuencias, beneficios y costos ambientales al sistema de precios de la economía;

III.- Otorgar incentivos a quien realice acciones para la protección, preservación o restauración del equilibrio ecológico. Asimismo, deberán procurar que quienes dañen el ambiente, hagan un uso indebido de recursos naturales o alteren los ecosistemas, asuman los costos respectivos;

IV.- Promover una mayor equidad social en la distribución de costos y beneficios asociados a los objetivos de la política ambiental



---

La sección VI de este mismo capítulo, *Normas Oficiales Mexicanas en Materia Ambiental*, dice en su artículo 36° que la Secretaría deberá emitir normas oficiales mexicanas en materia ambiental para estimular a los agentes económicos a reorientar los procesos y tecnologías para fomentar la protección al ambiente y el desarrollo sustentable.

El Capítulo IV, *Prevención y Control de la Contaminación del Suelo*, dicta los criterios para la prevención y control de la contaminación del suelo en el artículo 134:

II.- Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;

III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes

El artículo 140 establece que las normas oficiales mexicanas determinarán la forma de manejo de los residuos que no son fácilmente degradables:

**ARTICULO 140.-** La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial

Finalmente, el Título Quinto, *Participación Social e Información Ambiental*, en su Capítulo I, *Participación Social*, habla sobre la obligación del Gobierno Federal de promover la participación de la sociedad en la planeación ejecución evaluación y vigilancia de la política ambiental y de los recursos naturales.



---

Actualmente se encuentra también la iniciativa de ley de los residuos sólidos del Distrito Federal que fue vetada en el mes de enero de 2003 por el jefe de gobierno, esta ley proponía como objetivo regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como el servicio público de limpia.

Dentro de los apartados tratados por esta ley existe un título quinto que trata sobre la valorización y composteo de los residuos sólidos. El capítulo primero de este título es de interés para este estudio, en él se establecen las acciones que el gobierno del Distrito Federal llevaría a cabo en caso de aprobarse posteriormente esta ley.

El artículo 55 dicta que los productores o comercializadores que generen residuos sólidos que puedan ser reusables o reciclables deberán establecer planes de manejo para minimizar la generación de estos residuos, para tener un manejo responsable y para orientar a los consumidores de las ventajas que representaría el aprovechamiento de los residuos por medio del reciclaje.

El siguiente artículo responsabiliza a la Secretaría de Obras y Servicios y a la Secretaría de Desarrollo Económico a que realicen programas para la utilización de materiales provenientes de residuos sólidos de manera que promuevan mercados para su aprovechamiento.

En el artículo 57 se dicta que las dependencias y entidades del GDF establezcan sistemas de manejo ambiental y procuren que en los procesos de adquisición de bienes para la prestación de sus servicios se consuman productos compuestos por materiales valorizables.



---

El artículo 58 llama a las autoridades a fomentar programas para que en los grandes establecimientos se tengan espacios y servicios para la recepción de materiales y subproductos de los residuos sólidos valorizables.

En el siguiente artículo se dictan los requisitos que se piden a los establecimientos mercantiles, industriales y de servicios que se dediquen al reúso o reciclaje de residuos sólidos. Se habla de la ubicación del establecimiento, de los planes de manejo, de la existencia de personal capacitado y de que, al final de su operación el área donde estaba establecido quede libre de contaminación.

Finalmente en el artículo 60 se dicta que los residuos sólidos que no puedan ser reprocesados deberán enviarse para su disposición final.

Como se puede ver estas leyes dejan a voluntad de los implicados la implementación de cualquier programa de reciclaje ya que no son suficientemente explícitas para exigir que se recicle de manera regular.

Existen otro tipo de regulaciones que se emplean en la industria para fomentar acciones que ayuden a la mejora del ambiente, entre las cuales encontramos el etiquetado ecológico y la norma ISO 14000.

El etiquetado ecológico puede otorgarse cuando al realizar un ACV sobre un determinado producto se encuentra que éste es respetuoso con el ambiente. En países europeos, la concesión de esta etiqueta tiene como objetivo promover que los productos se fabriquen con el menor deterioro ambiental



---

posible e informa a los consumidores de las repercusiones al ambiente de los productos que consume. El etiquetado ecológico es de carácter voluntario.<sup>58</sup>

La norma ISO 14000 forma parte de una familia de normas que se refieren a la gestión ambiental aplicada a la empresa. Su objetivo es estandarizar las formas de producir y prestar servicios que protejan al ambiente, aumentando la calidad del producto y como consecuencia su competitividad.

Las normas desarrolladas por ISO son voluntarias, ya que se trata de un organismo no gubernamental y no depende de ningún otro organismo internacional por lo que no cuenta con autoridad para imponer sus normas en ningún país. La norma ISO 14000 no fija metas ambientales para la prevención de la contaminación, ni tampoco se involucra en el desempeño ambiental a nivel mundial, sino que, establece herramientas y sistemas enfocados a los procesos de producción al interior de una empresa u organización y a los efectos que estos puedan tener sobre el ambiente.<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup> Los plásticos y el tratamiento de sus residuos, p. 336

<sup>59</sup> <http://www.erdv.com.mx>



---

## Acciones internacionales para fomentar el Reciclaje

En el marco internacional se observa que muchos países han tomado desde hace ya mucho tiempo acciones para promover el reciclaje. A continuación se listan algunos de los decretos o leyes que se han aprobado en otros países para impulsar a las compañías productoras de plástico a que tomen parte en el tratamiento de los residuos:

- Italia, Decreto Ronchi, el decreto requiere que las compañías que introduzcan empaques en el mercado los recolecten una vez utilizados.
- Japón ha decretado una Ley de Contenedores y Embalajes para promover el reciclaje de papel y plásticos.
- Gran Bretaña decretó un objetivo obligatorio de lograr una capacidad de reciclaje de 15% en el año 2001.
- Luxemburgo, Ley Grand Ducal, requiere que las compañías que introducen empaques al mercado establezcan un sistema de recolección postconsumo.
- Holanda, Decreto para Empaques y Desechos de Empaque (1997), Convenio para Empaques II (1997). El decreto requiere que los productores y distribuidores de empaques recuperen y reciclen los empaques usados. Las autoridades locales son responsables de la recolección de desechos de empaque.



- Noruega, en 1991 el parlamento emitió una declaración que obligaba a la comunidad de negocios a reducir la cantidad de empaques utilizados y a recolectar los desechos reciclables. Se promueve el uso de empaques rellenables para limitar los desechos generados.
- Portugal, Decreto- Ley N° 366-A/97 (1997) – enmienda N| 162/2000 (2000), Orden N° 29-B/98 (enero 1998). El decreto pide que los distribuidores de empaques establezcan un sistema de depósito y recolección (para empaques reusables) o que desarrollen un sistema integral de recolección (para empaques no reusables). Si no cumplen con estos requisitos, las empresas no pueden operar en el mercado Portugués.
- España, Ley de Empaques 11/1997 (1997), Decreto Real 782/98 (Abril 1998), Ley para sistemas de depósito y recolección (1998). La ley pide que las empresas que introduzcan.
- Estados Unidos, diversos decretos como el Decreto de Prevención de la Contaminación (1990). Con este decreto se enfoca la atención de la industria, gobierno y público en general a reducir la cantidad de contaminación realizando cambios en la producción, operación y uso de materias primas. También incluye prácticas que aumentan la eficiencia en el uso de energía, agua u otros recursos naturales y conservan estos recursos. Dentro de estas prácticas se incluye y fomenta el reciclaje.



---

# CONCLUSIONES



---

## CONCLUSIÓN

El reciclaje de residuos plásticos contribuye a la ecología ya que da una respuesta al problema de los desperdicios, permite un ahorro hasta del 88%<sup>60</sup> de la energía que se requiere para producirlos y ayuda a la conservación de recursos naturales. Es por esto que se propone el reciclaje como una de las mejores opciones para aprovechar los desperdicios generados por su uso.

A partir de la información bibliográfica revisada en este trabajo, se propone lo siguiente:

- 1) Se debe fomentar por parte del gobierno el desarrollo de una cultura ambiental, mediante la cual se dé énfasis al reciclaje, capacitando a la población y proporcionando los medios para que se materialicen estas acciones.
- 2) Las leyes y normas propuestas deberán ser revisadas meticulosamente para lograr que manifiesten con claridad la necesidad y la obligatoriedad de los programas de valorización de residuos.
- 3) Se deberá aumentar la eficiencia de los programas de acopio de manera que se tenga una cultura de separación de residuos.

---

<sup>60</sup> Enciclopedia del Plástico 2000, p. 121



- 
- 4) Se recomienda la creación de programas de retornabilidad de residuos plásticos de manera que la población tenga un incentivo para separar y retornar los plásticos que deseché.
  - 5) Se recomienda también informar a inversionistas potenciales sobre los alcances económicos y ecológicos de programas de valorización como el reciclaje para fomentar la creación de empresas que se dediquen a este fin.
  - 6) Se recomienda establecer un subsidio que cubra la diferencia entre el precio del plástico reciclado y el precio del polímero virgen de manera que sea el mismo para así promover el uso del material reciclado.

Se debe prestar especial atención a la creación y regulación de normas y leyes que controlen y fomenten un mejor aprovechamiento de los desperdicios plásticos a través de acciones como el reciclaje. La legislación del reciclaje dará oportunidad al mejoramiento del ambiente y a la creación de nuevas fuentes de empleo.



---

# GLOSARIO



---

## GLOSARIO

**Ambiente:** El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

**Composteo:** Se basa en la fermentación de materias orgánicas contenidas en residuos sólidos, por la acción de bacterias que generan nutrientes para terreno agrícola.

**Densidad:** Masa de una sustancia dividida entre su volumen

**Desarrollo Sustentable:** El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras

**Disposición final:** La acción de depositar o confinar permanentemente los residuos sólidos en sitios o instalaciones cuyas características prevengan afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos.

**Grandes establecimientos:** establecimientos de mayoristas, tiendas departamentales y centros comerciales

**Gravedad específica:** Relación que entrega el peso que ocupa un volumen determinado de un líquido a igual volumen de agua destilada

**Incineración:** Combustión controlada de cualquier sustancia o material, cuyas emisiones se descargan a través de una chimenea

**Índice de fusión:** Mide la razón de extrusión de resinas fundidas a través de un molde de longitud y diámetro determinado, a condiciones determinadas de temperatura, carga, y posición del pistón.



---

**Material peligroso:** Elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, representen un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas

**Reciclaje:** circulación de materiales dentro de un sistema cerrado con el propósito de optimizar recursos, disminuir generación de basura, propiciar la separación de desperdicios e introducir los mismos al sistema productivo para generar artículos útiles al hombre

**Residuos sólidos:** Todos aquellos residuos en estado sólido que provengan de actividades domésticas o de establecimientos industriales, mercantiles y de servicios que no posean las características que los hagan peligrosos.

**Valorización:** La valorización de los desechos domésticos e industriales consiste en una serie de operaciones que permiten que los materiales sean reaprovechados como materia prima para otros productos.

**Viscosidad Intrínseca:** El promedio del peso molecular de resinas. Medida de la viscosidad en solución diluída (solvente fenol-tetracloroetano) en unidades dl/g



---

# BIBLIOGRAFÍA



## BIBLIOGRAFÍA

- MC MURRY, John; Química Orgánica, Grupo Editorial Iberoamérica, 3ª Ed., 1994, México
- <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polietileno.htm>
- Enciclopedia of Polymer Science and Engineering, 2ª Edición vol. 12, Mark Bikales Overberger Menges, Wiley Interscience, 1988, EU
- RAVVE A, Principles of Polymer Chemistry, Ed. Plenum, 1995, EU
- GÓMEZ, Ma. Rosa, José Ramón Gil, Los plásticos y el tratamiento de sus residuos, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1998, España
- "Standard definitions of terms relating to plastics" ASTM D883-86-b, American Society for testing and Materials. Phil. 1986
- <http://www.erres.org.uy/plastico.htm>
- <http://ponce.inter.edu/whoiswho/organiza/abacus/ismael/recycle.html>
- Kirk Othmer Enciclopedia of Chemical Technology, Supplement
- <http://mailweb.udlap.mx/>
- CURLEE, T. Randall, Plastic Wastes Management, Control, Recycling and Disposal, US EPA, Pollution Technology Review No. 201
- <http://www.petcore.org>
- [http://www.plastivida.com.ar/1\\_usos.htm](http://www.plastivida.com.ar/1_usos.htm)
- International Fiber Journal, June 1999 – Vol 14, Issue 3
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5a Ed. Vol A21 p 232-249



- 
- Chemical additives for the plastics industry. Radian Corporation ed. Noyes Data Corporation 1987 USA p33
  - STEPEK Daust, Additives for Plastics, Springer Verlag, NY 1983, p 50-51
  - SCHEIRS John, Polymer Recycling, Wiley Interscience, 1998
  - <http://www.repamar.org/>
  - <http://www.cce.org.mx/>
  - HARPER Charles, Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, 3a Ed.
  - CHANDA Manas, Roy SALIL, Plastics Technology Handbook, 3a Ed. NY 1998.
  - <http://www.plasticrevolutions.com/recycling.htm>
  - <http://www.newlifeplastics.com/>
  - <http://www.americanplasticscouncil.org/>
  - Enciclopedia del Plástico 2000, Capítulo 29, Tomo 3, Instituto Mexicano del Plástico Industrial.
  - Reciclado de plásticos, curso para personal de la industria, Asociación Nacional de la Industria del Plástico A.C.
  - SEDESOL, INE, Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalaje, serie monografías No. 4, Dr. Juan Antonio Careaga, 1993, México.
  - <http://www.clubresiduos.org/WB84.pdf>
  - ANIQ, estudio de mercado de reciclaje en México, elaborado por Grupo Texne, 21 de octubre de 2002
  - <http://www.allplasticbottles.org/markets.asp>
  - <http://www.inegi.gob.mx>



# ANEXOS



---

ANEXO I

**REFORMAS A LAS LEYES QUE CONTROLAN EL EQUILIBRIO  
ECOLÓGICO**

**DECRETO QUE REFORMA DIVERSAS DISPOSICIONES DE LA LEY  
GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCION AL  
AMBIENTE**

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>PRESENTÓ:</b>                      | Ejecutivo Federal.   |
| <b>FECHA DE<br/>INGRESO:</b>          | 6 de diciembre de 2001.  |
| <b>COMISIONES<br/>DICTAMINADORAS:</b> | Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca,<br>y de Estudios Legislativos.   |
| <b>DISCUSIÓN Y<br/>APROBACIÓN:</b>    | 15 de diciembre de 2001.<br>82 votos a favor.  |
| <b>SINOPSIS:</b>                      | Contar con un instrumento jurídico que dé<br>seguridad y protección a nuestro medio<br>ambiente y otorgar mayores atribuciones en<br>materia de gestión ambiental a los gobiernos de<br>las entidades federativas. |



---

REFORMAS LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA  
PROTECCIÓN AL AMBIENTE; LA LEY DE ADQUISICIONES,  
ARRENDAMIENTOS Y SERVICIOS DEL SECTOR PÚBLICO; Y LA LEY  
DE OBRAS PÚBLICAS Y SERVICIOS RELACIONADOS CON LAS  
MISMAS

PRESENTÓ: Senadora Gloria Lavara Mejía, a nombre de los senadores del PVEM.

FECHA DE INGRESO: 25 de septiembre de 2001

COMISIONES DICTAMINADORAS: **Gobernación; de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; y de Estudios Legislativos, Segunda.**

DISCUSIÓN Y APROBACIÓN: 30 de abril de 2002.  
83 votos a favor.

SINOPSIS: Que la Administración Pública Federal, el Poder Legislativo Federal y el Poder Judicial de la Federación, expidan los manuales de sistemas de manejo ambiental que tendrán por objeto la Optimización de los recursos materiales que se emplean para el desarrollo de sus actividades, con el fin de reducir costos financieros y Ambientales, cumpliéndose de esta forma, el objetivo de la iniciativa propuesta.



---

**PROYECTO DE LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS**

**PRESENTÓ:** Minuta de la Cámara de Diputados.  
Iniciativa del diputado Bernardo de la Garza Herrera, PVEM.

**FECHA DE INGRESO:** 29 de abril de 2002.

**COMISIONES DICTAMINADORAS:** Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca y Estudios Legislativos Primera.

**DISCUSIÓN Y APROBACIÓN** 13 de diciembre de 2002.

101 votos a favor.

**SE DEVOLVIÓ A LA CÁMARA DE DIPUTADOS.**

**SINOPSIS:** Garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.



---

## ANEXO II

### **INDUSTRIA DEL PLÁSTICO - RECICLADO DE PLÁSTICOS - SIMBOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL CONSTITUTIVO DE ARTÍCULOS DE PLÁSTICO - NOMENCLATURA**

### **PLASTIC INDUSTRY - RECYCLED OF PLASTICS - SYMBOLOGY FOR IDENTIFYING THE POLYMER OF PLASTIC ARTICLES - NOMENCLATURE**

#### **1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN**

##### **1.1 Objetivo**

Esta norma mexicana establece y describe los símbolos de identificación que deben portar los productos fabricados de plástico en cuanto a su material se refiere con la finalidad de facilitar su recolección, selección, separación, acopio, reciclado y/o reaprovechamiento.

##### **1.2 Campo de aplicación**

Esta norma mexicana es aplicable a todos aquellos productos fabricados de plástico, comercializados en el territorio nacional. Quedando excluidos aquellos artículos que por su tamaño no sea factible incluir el símbolo de reciclado de manera legible.

---

2

**REFERENCIAS**

Para la correcta aplicación de esta norma se debe consultar la siguiente norma mexicana vigente o la que la sustituya:

NMX-E-060-1978 Terminología de plásticos. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de diciembre de 1978.

3

**DEFINICIONES**

Para las definiciones pertinentes a esta norma debe consultarse la norma mexicana NMX-E-060 (ver 2 Referencias), así como la que se establece a continuación:

3.1 Símbolo de identificación

Figura simple que permite identificar el material empleado en la fabricación de productos de plástico, se compone por tres flechas que forman un triángulo con un número en el centro y abreviatura opcional, en la base (véase figura 1).

Abreviatura del material



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

FIGURA 1.-Símbolo de identificación

De acuerdo al tipo de materia prima y para efecto de diferenciar, los productos de plástico se clasifican por el número de identificación (véase tabla 1).

TABLA 1.- Clasificación de materiales de plástico

| <i>Nombre</i>                     | <b>Abreviatura<br/>(opcional)</b> | <b>Número de<br/>identificació<br/>n</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Polietilentereftalato             | PET o PETE                        | 1  |
| Polietileno de alta<br>densidad   | PEAD o HDPE                       | 2  |
| Policloruro de vinilo o<br>Vinilo | PVC o V                           | 3  |
| Polietileno de baja<br>densidad   | PEBD o LDPE                       | 4  |
| Polipropileno                     | PP                                | 5  |
| Poliestireno                      | PS                                | 6  |

El símbolo de identificación en productos fabricados de cualquier material de plástico, debe cumplir con las siguientes especificaciones:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## 5.1 Forma de identificación

El símbolo de identificación debe componerse de tres flechas que formen un triángulo con un número en el centro, de acuerdo al material con que fue fabricado el producto (véase figura 2).



FIGURA 2.-Formas de identificación

## 5.2 Dimensiones

Las dimensiones del símbolo deben ser de acuerdo al diseño del producto que se requiera fabricar, siempre y cuando sea lo más visible posible. El tamaño mínimo recomendado del símbolo es de 12,7 mm.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

### 5.3 Marcado y ubicación del símbolo

El símbolo debe incluirse de forma legible e indeleble, en zonas del producto donde no afecte su funcionalidad y sea de fácil observación.

Las especificaciones estipuladas en esta norma deben verificarse visualmente.



---

## ANEXO III

### DECRETO POR EL QUE SE CREA LA LEY LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO FEDERAL

**ARTÍCULO UNICO:** Es de aprobarse y se aprueba la Ley de Los residuos sólidos del Distrito Federal en los siguientes términos:

#### LEY DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO FEDERAL (Fragmento)

#### TITULO QUINTO

#### DE VALORIZACIÓN Y COMPOSTEO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

#### CAPITULO I DEL RECICLAJE

**Artículo 55.** Los productores y comercializadores cuyos productos y servicios generen residuos sólidos susceptibles de valorización mediante procesos de reuso o reciclaje realizarán planes de manejo que establezcan las acciones para minimizar la generación de sus residuos sólidos, su manejo responsable y orientar a los consumidores sobre las oportunidades y beneficios de dicha valorización para su aprovechamiento.

**Artículo 56.** La Secretaría de Obras y Servicios, en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Económico, en cumplimiento a lo señalado en el Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos, instrumentarán programas para la utilización de materiales o subproductos provenientes de los residuos sólidos a fin de promover mercados para su aprovechamiento,



vinculado, al sector privado, organizaciones sociales y otros agentes económicos.

**Artículo 57.** Las dependencias y entidades del Gobierno del Distrito Federal, de las delegaciones, de la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, el Tribunal Superior de Justicia del Distrito Federal y demás órganos autónomos, establecerán en sus oficinas y dependencias de sistemas de manejo ambiental, los cuáles tendrán por objeto prevenir, minimizar y evitar la generación de residuos aprovechar su valor.

Asimismo, promoverán que en sus procesos de adquisiciones de bienes para la prestación de sus servicios y cumplimiento de sus funciones, se opte por la utilización y el consumo de productos compuestos total o parcialmente de materiales valorizables, en congruencia con lo que establece la Ley de Adquisiciones del Distrito Federal.

**Artículo 58.** Las autoridades fomentarán programas para que los establecimientos de mayoristas, tiendas de departamentos y centros comerciales se cuente con espacios y servicios destinados a la recepción de materiales y subproductos de los residuos sólidos valorizables.

**Artículo 59.** Todo establecimiento mercantil, industrial y de servicios que se dedique a la reutilización o reciclaje de los residuos sólidos deberán:

- I. Obtener autorización de las autoridades competentes;
- II. Ubicarse en lugares que reúnan los criterios que establezca la normatividad aplicable;
- III. Instrumentar un plan de manejo aprobado por la Secretaría para la operación segura y ambientalmente adecuada de los residuos sólidos que valore;
- IV. Contar con programas para prevenir y responder a contingencias o emergencias ambientales y accidentes;



- 
- V. Contar con personal capacitado y continuamente actualizado; y
  - VI. Contar con garantías financieras para asegurar que al cierre de las operaciones en sus instalaciones, éstas queden libres de residuos y no presenten niveles de contaminación que pueden representar un riesgo para la salud humana y el ambiente.

**Artículo 60.** Los residuos sólidos que hayan sido seleccionados y remitidos a los mercados de valorización y que por sus características no puedan ser procesados, deberán enviarse para su disposición final.



---

## ANEXO IV

### ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN LA FABRICACIÓN DE BOTELLAS DE 1000 CC DE PEAD

Las botellas estarían destinadas a envasar como unidad funcional una tonelada de detergente líquido. Para simplificar se considera que su densidad es  $1 \text{ g/cm}^3$ .

#### *Definición del sistema*

El sistema se define de manera que todas las entradas derivan de los recursos de la tierra y las salidas se incorporan a ella, incluyen los productos al final de su vida útil, con el fin de que los resultados obtenidos representen el ecobalance del producto.

¿Qué se debe considerar dentro del sistema? Esencialmente siempre hay tres tipos de operaciones que aparecen en todos los procesos industriales:

1. Industrias productoras de energía
2. Secuencia principal de producción
3. Obtención de productos secundarios

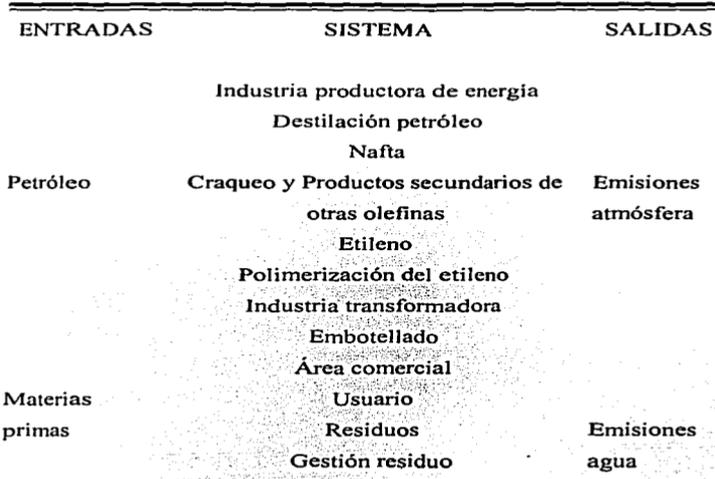


Figura 39. Esquema de entradas y salidas sobre el sistema

La obtención de productos secundarios debe contabilizarse como un ahorro del sistema, ya que con las mismas entradas se obtienen productos de los que se pueden recuperar costos. Sería el caso de los productos separados en la destilación del petróleo para obtener la nafta, y en la transformación de la nafta para la obtención de etileno en la que aparecen otras olefinas como productos secundarios.

En la secuencia de producción principal se agrupa una serie de operaciones:



- a) **Energía.** La energía total necesaria que se define como la suma de otras parciales como:
- a. **Energía directa.** Energía consumida directamente en las operaciones de fabricación consideradas dentro del sistema.
  - b. **Energía de alimentación.** Energía contenida en los combustibles que son considerados como materias primas, por ejemplo el petróleo en este caso.
  - c. **Energía indirecta.** Es la energía utilizada por las industrias productoras de combustible para suministrar las energías directas de alimentación y transporte.
- b) **Materias primas.** Cuando los requerimientos de materias primas del sistema son referidos a los materiales extraídos de la tierra, el número de materiales diferentes es notablemente pequeño, considerándose además de petróleo, el agua empleada, carbonatos de relleno, etc.
- c) **Residuos sólidos.** La cantidad total de residuos generados durante la producción, uso y abandono de 1000 botellas de 1000 cc es de alrededor de 1.1 Tm.
- Cuando esta cantidad se considera por componentes, se puede comprobar que los contenedores por sí mismos representan solamente el 2% de los residuos totales.
- d) **Emisiones a la atmósfera y a las aguas.** El cálculo de las emisiones producidas no es tan fácil de realizar como en el otro tipo de cálculo anterior. Toda la normativa que regula las emisiones se refiere siempre a una determinada concentración permitida que puede ser emitida a los diferentes medios, y no hay datos del volumen de emisiones generado.



---

### *Producción de polietileno*

Dentro del sistema definido en la figura 39 la producción de polietileno representaba una etapa intermedia en el proyecto de fabricación de botellas. Las consideraciones que deben realizarse son:

- En este caso, en las entradas considerando la energía y la materia prima existe una sola sustancia: el petróleo.
- Los calculos se refieren al objetivo propuesto, la fabricación de 1000 botellas de PEAD.

### *Cálculo de la energía*

Debe sumarse la energía directa consumida en cada una de las "etapas subsistema" definidas en la figura 39, considerando el rendimiento energético asociado a cada una de ellas. Análogamente se opera con los otros tipos de energía, la indirecta y la de alimentación. No debe olvidarse la energía consumida en transportar el crudo desde su origen hasta la industria petroquímica transformadora y la industria productora de energía.

### *Cálculo de materias primas*

Se consideran como tales el petróleo, catalizadores específicos y los aditivos.



---

### *Cálculo de las salidas*

Se realiza en tres apartados diferentes: emisiones a la atmósfera, emisiones a las aguas y residuos sólidos.

Las emisiones gaseosas a considerar son: polvo, monóxido y dióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

Las emisiones a las aguas a considerar son: polvo, monóxido y dióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

Las emisiones a las aguas a considerar son: cantidad de productos ácidos, metales, hidrocarburos, sólidos en suspensión, sólidos disueltos, petróleo, etc.

En cuanto a los residuos sólidos se cuentan los residuos producidos en el momento de la extracción, los producidos por la industria transformadora y las cenizas.

Una vez obtenido el PEAD, se consideran los siguientes subsistemas: fabricación de las botellas, llenado, venta, consumo y gestión del residuos. En todas ellas debe considerarse como entrada energética el consumo directo de la operación y el indirecto del transporte a cada una de las plantas operadoras. En cuanto a las materias primas deben considerarse los productos necesarios para cerrar y rotular los envases, y los contenedores para transportarlos hasta los puntos de venta.



---

Una vez finalizado el proceso productivo hasta llegar la botella a manos del consumidor, cuando éste se desprende de ella pasa a ocupar la condición de residuos. La gestión del mismo cerrará el ciclo de vida del material.

*Resultados sobre la gestión de los residuos de las botellas*

Existe un estudio completo presentado por APME y realizado por Dow Europe, en el que se analizan y comparan los diferentes métodos de gestión de los envases post-consumo de PEAD.

En el estudio en cuestión se definen las alternativas posibles de gestión, analizándose las más satisfactorias en términos de aprovechamiento energético y de impacto ambiental. La conclusión del estudio fue que la alternativa óptima la ofrecía una combinación de reciclado mecánico con recuperación de energía.<sup>61</sup>

---

<sup>61</sup> Los plásticos y el tratamiento de sus residuos, p. 322