



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN EN RECICLAJE DE
POLIMEROS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

Luis Alejandro Córdova González

CDMX

2021





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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Ruiz Trejo Rodolfo**

VOCAL: **Profesor: Álvarez Maciel Carlos**

SECRETARIO: **Profesor: Hernández Meléndez Oscar**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Manríquez Tolsa Úrsula**

2° SUPLENTE: **Profesor: Basurto García German**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Rodolfo Ruiz Trejo y firma

SUSTENTANTE:

Luis Alejandro Córdova González y firma

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, particularmente debo mencionar a la Facultad de Química por proporcionarme la preparación científico tecnológico que me permitirá llevar un desarrollo profesional en el ámbito de conciencia social responsable y eficiente.

Al **M. en I. Rodolfo Ruiz Trejo** de manera especial por todo su apoyo en el desarrollo de este proyecto y dentro de la carrera, gracias por compartir su conocimiento de manera profesional ya que sin sus observaciones y aportaciones esto no hubiera sido posible.

Al **M. en I. Carlos Álvarez Maciel**, por su asesoría y las aportaciones a la redacción final del presente trabajo, así como la constante disponibilidad de ayudar a lo largo de la carrera brindando un ambiente de confianza.

Al **Dr. Oscar Hernández Meléndez** por las observaciones realizadas durante la revisión del texto final, así como la motivación para seguir adelante.

A mi familia por siempre creer en mí formando mi primer equipo de trabajo y haber forjado la convivencia y los valores necesarios para hacerle frente a los obstáculos que en los caminos pueden aparecer, gracias por haber hecho posible ésta gran aventura. Gracias por tanto amor.

Resumen.....	7
Capítulo 1: Introducción.....	8
1.1 Importancia de los polímeros en el mundo.....	10
1.2 Producción Mundial.....	10
1.3 Problemas de contaminación en el mundo.....	11
1.4 Degradación de residuos plásticos.....	13
1.5 La industria del plástico en México.....	14
1.6 Estado del reciclaje en México.....	15
Capítulo 2: Marco Teórico.....	16
2.1 Macromoléculas.....	17
2.2 Clasificación general de los polímeros.....	17
2.3 Por su estructura molecular.....	19
2.4 Por su morfología.....	21
2.5 Por sus características intermoleculares.....	22
2.6 Por su uso industrial	23
2.7 Peso Molecular promedio y polidispersidad.....	23
2.8 Grado de entrecruzamiento y distribución de pesos moleculares.....	26
2.9 Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión cristalina.....	27
2.10 Grado de polimerización polidispersidad.....	30

Capítulo 3: Reciclaje de polímeros.....	31
3.1 Código de identificación de plásticos commodities.....	31
3.2 Características de los plásticos commodities y usos más frecuentes.....	34
3.21 Tereftalato de polietileno (PET).....	34
3.22 Polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE).....	35
3.23 Cloruro de polivinilo (PVC).....	37
3.24 Polietileno de baja densidad (PEBD/LDPE).....	41
3.25 Polipropileno (PP).....	43
3.26 Poliestireno (PS).....	48
3.3 Procesamiento de plásticos commodities.....	52
3.4 Dificultades de reciclaje de plásticos commodities.....	53
3.5 Descripción de etapas típicas de reciclaje de plásticos commodities en planta en Latinoamérica.....	54
3.51 Reciclaje Mecánico.....	56
3.52 Separación de plásticos.....	57
3.53 Molienda.....	60
3.54 Lavado y Secado.....	60
3.55 Pelletizado.....	61
3.6 Procesado final.....	63
3.61 Inyección.....	63
3.62 Soplado.....	66

3.63 Hilado.....	67
3.64 Calandrado.....	68
3.65 Termoformado.....	69
3.66 Espumas.....	69
3.67 Recubrimientos.....	70
3.7 Procesamiento de plásticos commodities de acuerdo a sus consideraciones de operación.....	72
3.71 Reciclaje de PET.....	73
3.72 Reciclaje de HDPE/PEAD.....	74
3.73 Reciclaje de LDPE/PEBD.....	74
3.74 Reciclaje de PVC.....	75
3.75 Reciclaje de PP.....	75
3.76 Reciclaje de PS.....	76
Capítulo 4: Enfoque de calidad y normatividad para manejo de residuos plásticos.....	77
4.1 Gestión de Calidad.....	78
4.11 Enfoque al cliente.....	81
4.12 Acciones preventivas y correctivas.....	82
4.13 Establecimiento de la política de calidad y mejora continua.....	85
4.14 Importancia de las auditorías internas y externas.....	86
4.2 Situación legal del reciclaje en México.....	87
4.3 Seguridad e Higiene.....	90

Capítulo 5: Maneras alternas de reciclaje de plásticos commodities.....	92
5.1 Reutilización.....	93
5.2 Incineración.....	94
5.3 Reciclaje químico.....	94
5.31 Pirolisis.....	95
5.4 Terraplén.....	98
5.5 Ingeniería verde.....	99
Proyección ciencia consciencia.....	100
Observaciones finales.....	101
Referencias.....	102
<i>Anexo I</i>	105
<i>Anexo II</i>	106

RESUMEN

Actualmente nos encontramos en una era donde es evidente la necesidad de una reforma global en términos industriales sobre el procesamiento y reciclaje de polímeros ya que aunque actualmente ya existen campañas ambientales dirigidas al reciclaje, aún queda mucho por hacer debido a que actualmente aun las cifras globales de contaminación, principalmente por “plásticos”, alcanza las seis cifras en toneladas de desperdicio anualmente arrojadas al mar, calculando así un flujo total de 200 kg por segundo de éstos polímeros que llegan a los océanos. Por ello, el presente estudio tiene como finalidad ilustrar y aportar ideas útiles tanto en la academia como en el campo industrial encaminadas a la mejora continua, y reducción de contaminantes resultado de técnicas de manufactura de plásticos, así como desarrollar conciencia en profesionales de la ingeniería en quienes recae la permanente responsabilidad tanto de mejorar procesos como la de cuidar del personal y del medio ambiente.

Entre los polímeros de mayor consumo clasificados como de un solo uso, destacan los denominados “plásticos commodities”, término en el idioma inglés que designa a plásticos de muy alta demanda y consumo, además de bajo costo de producción. Estos plásticos son reciclables, no obstante, constituyen en la actualidad una importante fuente de contaminación.

En el presente trabajo de actualización monográfica, se pretende dejar información de consulta útil para futuros ingenieros que cultive el manejo de buenas prácticas de reciclaje, así como la reducción de poluciones en la industria, lo que a su vez se verá reflejado en reducción de costos industriales en diversas ocasiones. Se pretende también desarrollar e incentivar el manejo de innovación con fines tanto académicos como personales e industriales sin dejar de mencionar las consecuencias tanto positivas como negativas que de ella puedan resultar en términos de salud.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

“El primer paso para el conocimiento es reconocer que somos ignorantes.”

Sócrates

1. INTRODUCCIÓN

El término polímeros se deriva del griego: **πολυς** [polys] "mucho" y **μερος** [meros] "parte" o "segmento". Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de compuestos más pequeños llamados monómeros que se repiten [1].

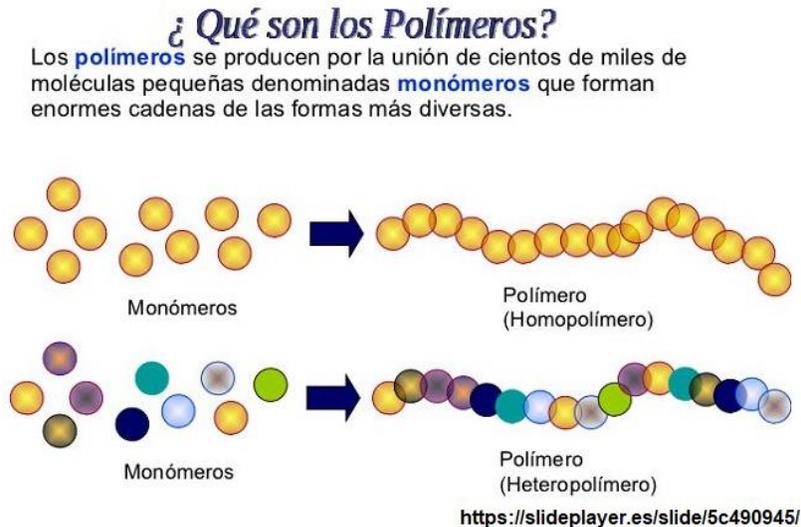


Figura 1. Los polímeros.

Coloquialmente, es decir, en el lenguaje común, los plásticos son referidos como materiales constituidos por una gran cantidad de compuestos orgánicos, que tienen la propiedad de ser maleables, esto quiere decir, que pueden ser moldeados, obteniéndose finalmente objetos sólidos con diferentes formas para emplearse en una gran cantidad de aplicaciones. El término "plásticos", proviene de la palabra plasticidad, término que describe la propiedad de algunos materiales respecto a la capacidad de deformarse sin llegar a romperse. Los plásticos pueden ser sintéticos, o de origen natural. Los plásticos, realmente son polímeros orgánicos, por lo tanto están constituidos por cadenas de alto peso molecular, es decir, están constituidos por macromoléculas, e integran un grupo de los compuestos denominados polímeros.

Los plásticos sintéticos, son fundamentalmente derivados de productos petroquímicos, industrialmente son de relativamente fácil aplicación y con costos reducidos.

Esta razón de tipo económico propicia que los plásticos sean ampliamente utilizados en la elaboración de productos desechables, tales como envases, utensilios para el manejo de alimentos y bolsas de basura. Otras aplicaciones importantes se encuentran en la industria de la construcción, movilidad y transporte, partes de dispositivos eléctricos y electrónicos, agricultura, atención sanitaria, etc. [2].

1.1 Importancia de los polímeros en el mundo

A lo largo de la historia la humanidad se ha preocupado por alcanzar cada vez niveles más altos de desarrollo con la ayuda de la ciencia y la tecnología, en este sentido el hombre ha procurado inventos que proporcionen mejoras generales y específicas para la vida cotidiana. Con la llegada de la industrialización llegaron nuevos retos a solucionar como lo es la tarea de encontrar materiales cuyas características estructurales y comerciales se adapten a necesidades cada vez más estrictas como lo son la eficiencia de procesos, funcionalidad y facilidad de obtención que se traduce en la proporción costo-beneficio de cada material. Tales son las características mecánicas y termodinámicas de los polímeros que han permitido un desarrollo exponencial en la industria satisfaciendo la creciente demanda de la población mundial en diversos campos como aeronáutica, autopartes, industria refresquera, industria alimenticia, entre otros.

1.2 Producción Mundial

El consumo de *plásticos commodities* en el mundo ha sobrepasado la capacidad humana para su reciclaje, la Organización de las Naciones Unidas *ONU* advierte que cada año se producen más de 400 millones de toneladas de plástico en el mundo, ya sea para fabricación de envases, materiales de construcción, utensilios de cocina, autopartes, entre otros y sólo un 9 por ciento de los desperdicios son reciclados. Se calcula que alrededor de 8 millones de toneladas llegan a los mares anualmente, esto representa un total de 200kg por segundo según datos de la Organización de las Naciones Unidas [3].

¿Cómo se alcanzaron estas cifras? Se han producido 8.3 billones de toneladas de éstos polímeros a partir de 1950 de las cuales el 60% ha terminado en basureros y

en el medio ambiente. El plástico no se inventó hasta mediados del siglo XIX pero hasta mediados del siglo XX comenzó a producirse a gran escala. De la década de 1950 a la década de 1970 el desecho del plástico era considerablemente manejable.

La demanda de plástico para sus diferentes usos se triplicó en la década de los 1990s lo que ocasionó un aumento de igual magnitud en su producción. La demanda y producción de estos polímeros continuó aumentando exponencialmente de tal manera que tan solo la primera década de los 2000s el desperdicio de plástico superó las cifras reportadas en los 40 años anteriores. Hoy se producen 400 millones de toneladas al año. Esto es equivalente a la masa de la población mundial entera.

1.3 Problemas de contaminación en el mundo

La elevada producción de *plásticos commodities* representa principalmente un problema de contaminación marítima sin embargo, es preciso mencionar que no solo los mares y ríos se ven afectados directamente sino también la tierra, al no tener una gestión completa de residuos, éstos sobrepasan el espacio disponible en rellenos sanitarios, e incluso terminan siendo arrojados a las calles en proporciones visibles. Lo anterior repercute también de diferentes maneras en la contaminación aérea ya que dentro de los aditivos comunes del plástico encontramos compuestos como los bisfenoles, los ftalatos, los retardantes de llama y los metales pesados que son muy peligrosos para la salud y pueden llegar a vías respiratorias (o ingesta directa) generando cambios hormonales e incrementando el riesgo de desarrollar cáncer [4].



Figura 1.1 Usos más comunes a nivel mundial de plásticos [1].

Entre los plásticos de mayor consumo mundial se encuentran el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE), el poliestireno (PS), el poliestireno expandido (EPS), y el polipropileno (PP), y el policloruro de vinilo (PVC) estos polímeros suelen ser referidos como plásticos commodities.

La contaminación por plásticos es un problema global, sin embargo, geográficamente podemos encontrar una mayor concentración de esta polución en vertientes de ríos de países altamente productores.

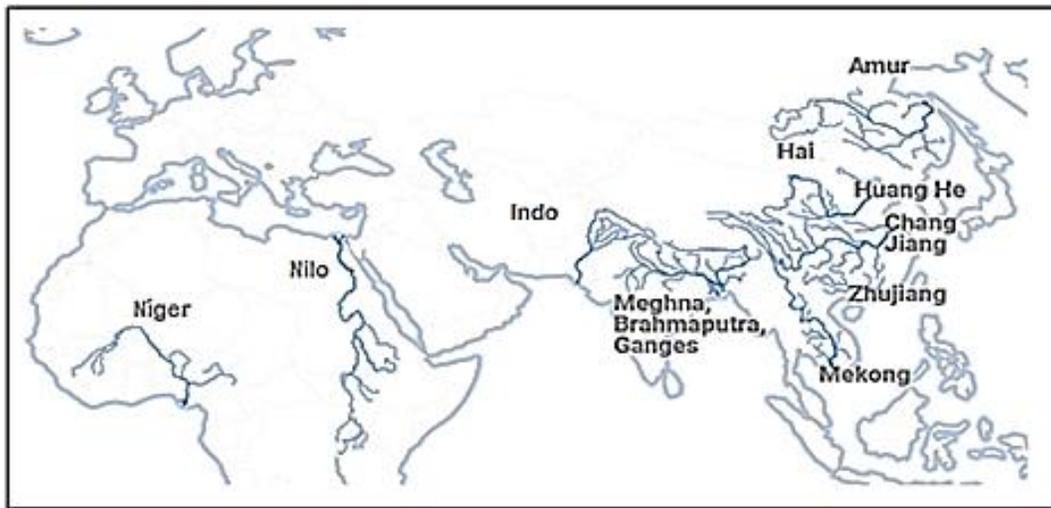


Figura 1.2 El 90% de los desechos plásticos que terminarán en los océanos en el mundo son acarreados por solo 10 ríos [2].

Estados Unidos, Japón, y algunos países de Europa son altos productores de éstos polímeros commodities, sin embargo, también se encuentran entre los mejores gestores de sus residuos mientras que países como China, Indonesia, Tailandia, y Viet Nam que de igual forma son productores en potencia de plástico, no son capaces de llevar un adecuado manejo de sus residuos.

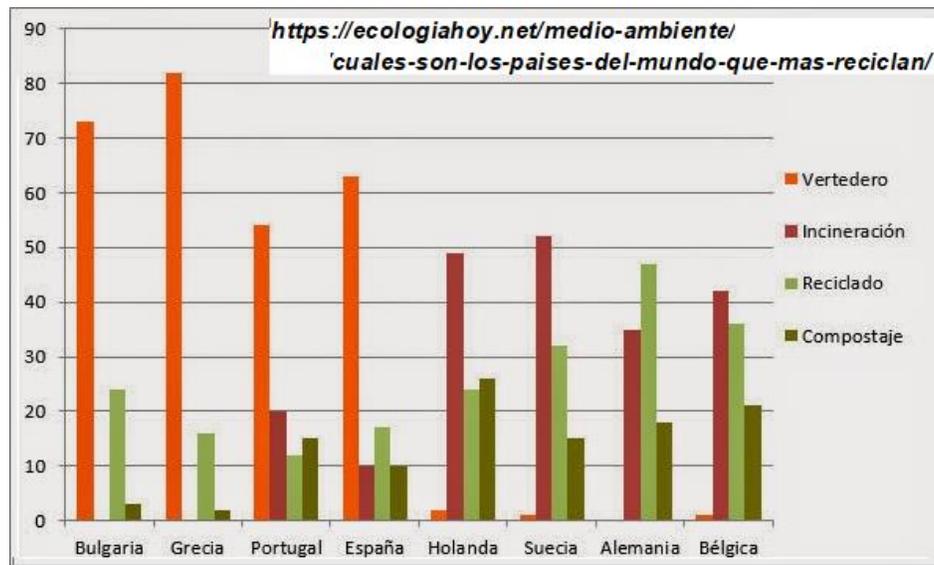


Figura 1.3 Diferentes formas de gestión de los residuos en varios países de la UE en 2012, Fuente Eurostat 2012

1.4 Degradación de residuos plásticos

La degradación es la reacción o conjunto de reacciones mediante las cuales una molécula compleja se descompone en otras más simples, comprender dicho concepto significa tener consciencia acerca del tiempo que determinado plástico permanecerá en contacto con el medio ambiente ocasionando su deterioro, este mismo concepto es de vital importancia para la industria del reciclaje dado que son las condiciones de determinado lote de plástico recolectado las que determinarán la viabilidad de su reproceso, en otras palabras; el estado del material plástico recolectado definirá su precio, y en gran parte la toma de decisión sobre si determinada empresa aceptará uno u otro lote para reproceso, ocasionando así que todos aquellos lotes con degradación notablemente visible sean rechazados y terminar de ese modo en gran parte desechados en tiraderos.

Para dar una idea más gráfica de lo que esto representa, se debe tomar en cuenta que todos los materiales se degradan pero a diferentes velocidades, y es un proceso gradual que depende tanto de las características del material en sí, como del medio en que se encuentra por lo que puede ser algo malo en cuestiones de reciclaje como se mencionó en el párrafo anterior, o algo bueno en ciertas ocasiones si se habla de periodos bajos de degradación que pueden resultar benéficos para el medio ambiente.

No existe una escala universal para determinar qué tan degradables son los materiales; lo común es hacerlo mediante la comparación de diversos.

Los plásticos commodities son materiales altamente recalcitrantes e inertes, por lo tanto son muy difíciles de degradar en el medio ambiente incluso después de haber sido enterrados durante varios años. Una bolsa de plástico común (LDPE) podría tardar 150 años en degradarse una vez enterrada mientras que un envase de PET tardaría de 500-900 años por lo que es competencia de la ciencia y la tecnología tomar medidas adecuadas para su tratamiento post consumo.

1.5 La industria del plástico en México

La industria del plástico en México tiene un valor de \$30,000 millones de dólares (mddd) lo que representa UN 2.6% del PIB del rubro manufacturero, con un aproximado de 4,100 empresas que participan en la producción de plásticos para uso general como envases, embalaje, construcción, automotriz, agrícola, y médico, mismas que generan alrededor de 260,000 empleos directos.[5]

En México se consumen 1,951,785 kg de plástico diariamente de los cuales el 12% no es correctamente manejado.

Actualmente ya se cuentan con campañas nacionales e internacionales acerca del consumo y reciclaje de plásticos. El 1 de enero del 2020 en México entró en vigor la reforma aprobada el 9 de mayo 2019 que tiene por enunciado la prohibición de bolsas de plástico en comercios y centros comerciales, se señaló que para quien no cumpla con lo dispuesto en la Ley de Residuos Sólidos en la Ciudad de México habrá sanciones que van de los 42 mil a los 170 mil pesos (de 2.218 a

8.980 dólares). Esta es solo una iniciativa que se ha logrado llevar a cabo, sin embargo, existen aún diversas áreas de oportunidad para el manejo de los desechos plásticos. De acuerdo con esta Ley los plásticos se consideran como residuos inorgánicos. ANEXO I

1.6 Estado del reciclado de plásticos en México

En México se recicla el 56% del PET que se utiliza y en la capital del país, éste porcentaje asciende al 90%. Asimismo se han invertido 340 mdd en plantas de reciclaje en el país, y más de 90mdd para fomentar el acopio y la educación ambiental en los últimos 17 años.

Sin embargo las cifras para otro tipo plásticos commodities no son tan alentadoras ya que si bien el reproceso de los plásticos commodities tiene en su origen muchas semejanzas que les dan la posibilidad de ser reciclados con la misma eficiencia, actualmente se enfrenta el conflicto central de que en su gran mayoría (95%), solo se utilizan una vez antes de ser desechados debido a la naturaleza de su función como lo es el caso del polipropileno (PP) de uso farmacéutico. O por otro lado el polietileno de alta densidad que al tener una demanda de producción para su reproceso en el país baja, muchas empresas no lo comercializan en la misma magnitud que otros plásticos.

Además es pertinente tomar en consideración la procedencia de los residuos plásticos antes de elegir la forma en que será gestionado pues tomando por ejemplo una bolsa de plástico común elaborada con polietileno de baja densidad (LDPE), será fácil notar que dada la cotidianidad de uso, y la facilidad de adquisición, ésta puede contener contaminantes tóxicos o dañinos para la salud.

Existen áreas de oportunidad diversas en cuánto al reciclaje de residuos plásticos en México, y dada la naturaleza de cada material en cuánto a propiedades mecánicas, químicas, e incluso económicas, es pertinente abordar reformas en materia legal, científica, y tecnológica manteniendo siempre una ética de sustentabilidad, y desarrollo de la mano con el medio ambiente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

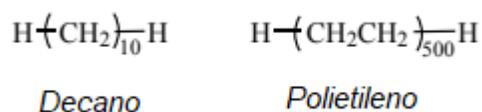
“En la vida no existe nada que temer, solo cosas que comprender.”

Marie Curie.

2.1 Macromoléculas

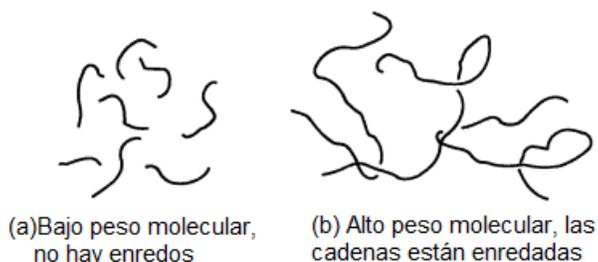
Las sustancias denominadas macromoléculas son moléculas gigantes con pesos moleculares que van de los miles a los millones.

Los polímeros son macromoléculas conformadas mediante la unión repetida de unidades, en principio la primera diferencia que se puede especificar en una molécula pequeña de determinado alcano y un polímero es la cantidad de unidades repetidas.



En este sentido cabe mencionar que los polímeros se encuentran dentro del conjunto de las macromoléculas pero no todas las macromoléculas son polímeros ya que se pueden encontrar moléculas gigantes “macromoléculas” de naturaleza no necesariamente polimérica, tal es el caso de las proteínas.

En tanto que el peso molecular mínimo requerido por una sustancia para ser considerada un polímero está sujeto a un continuo debate, frecuentemente diferentes investigadores en el área de polímeros colocan este número en aproximadamente 25,000 g/mol. Este es el peso molecular mínimo requerido por muchos polímeros importantes para mostrar propiedades físicas y mecánicas bien definidas. Este peso molecular es también cercano al inicio del efecto de “entanglement”, o sea, el enredo entre moléculas, lo que conduce a la formación de ovillos [6].



2.2 Clasificación general de los polímeros

De acuerdo al objetivo perseguido cuando se habla de polímeros es necesario localizar las variables a considerar para un mejor entendimiento, es por ello que existen diversas formas de clasificar a los polímeros que abarcan diferentes criterios desde su estructura química, tamaño, propiedades físicas, mecánicas, termodinámicas, entre otras.

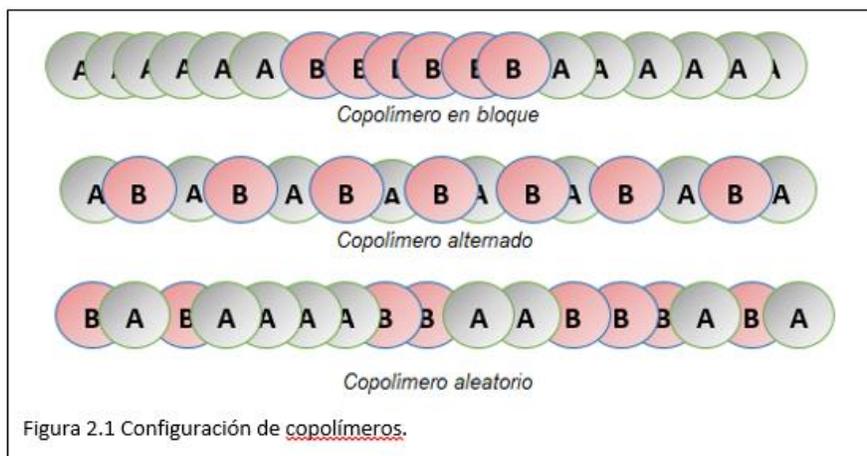
2.21 Homopolímeros

En un homopolímero existen monómeros de un solo tipo a lo largo de la cadena polimérica.



2.22 Copolímeros.

A la presencia de dos o más tipos de monómeros en una cadena polimérica se le denomina copolímeros, y pueden presentarse de forma alternada, por bloque, o aleatoriamente (figura 2.1).



2.3 Estructura molecular

Lineales

Un polímero lineal consiste en una sola cadena continua de monómeros de repetición.

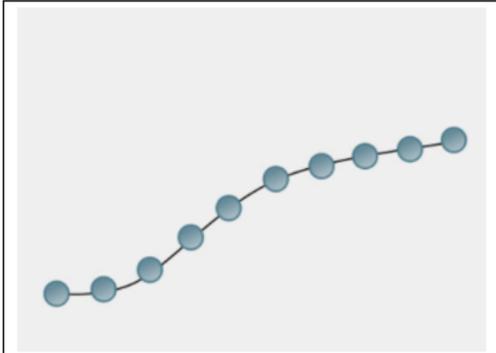


Figura 2.2 Esquema de polímero lineal.

Ramificados

Los polímeros ramificados se forman cuando a partir de una larga cadena polimérica se forman cadenas laterales de grupos de unidades.

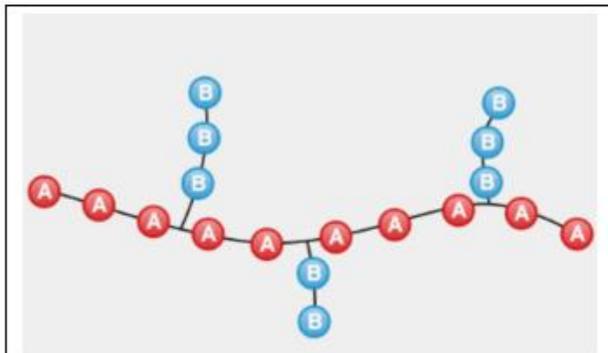
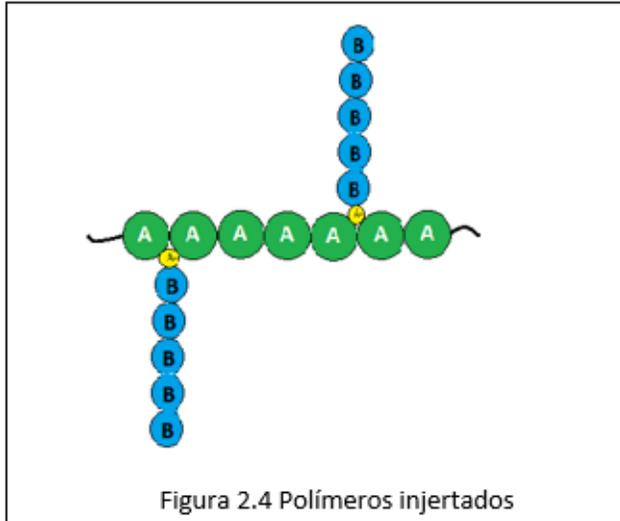


Figura 2.3 Esquema de polímero ramificado.

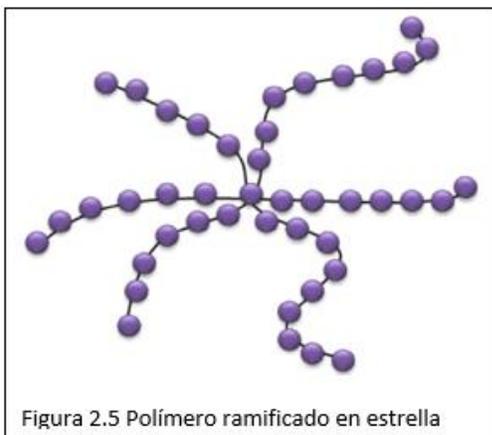
Polímero injertado

Los polímeros de injerto son copolímeros segmentados con una cadena lineal principal de un tipo de polímero y distribuidos en ramificaciones de otro.



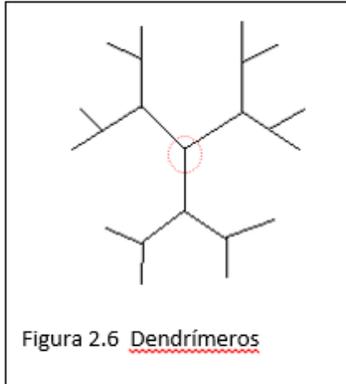
Ramificado en estrella

Se forman cuando a partir de una misma unidad central emergen tres o más ramificaciones.



Dendrimeros

Son polímeros con alto grado de ramificación que forman una macromolécula de estructura semejante a la de un árbol.

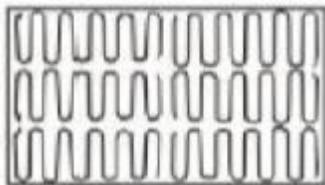


Cada conformación de las posibles unidades de repetición (monómeros) otorgan al polímero resultante nombres y características completamente diferentes incluso si sus componentes son los mismos.

2.4 Morfología

Los polímeros pueden ser cristalinos, semicristalinos, y amorfos.

Un polímero cristalino es aquel en el cuál todas las cadenas poliméricas se encuentran dispuestas en estructuras altamente regulares.



Un polímero amorfo por el contrario, carece de orden molecular.



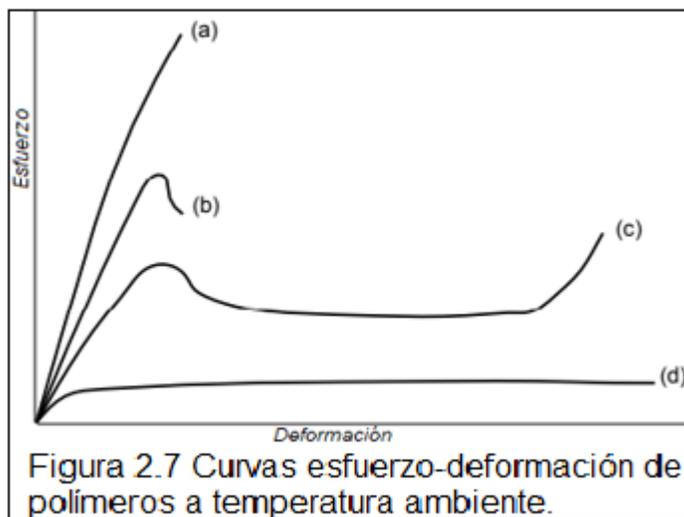
Por lo tanto un polímero semicristalino no se encuentra en ninguno de estos extremos.



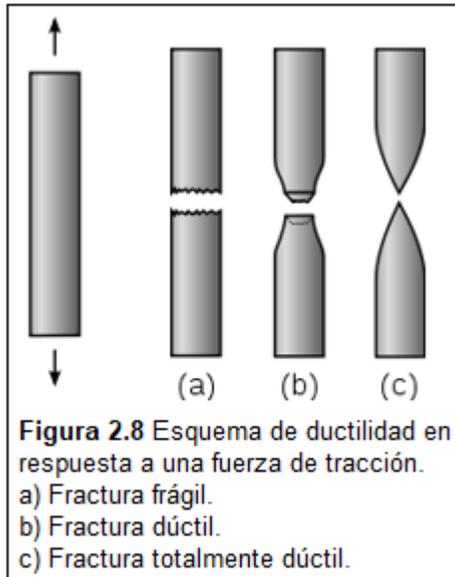
Algunas de las propiedades de los polímeros aumentan de manera directamente proporcional a su carácter cristalino como opacidad, resistencia a la tracción, temperatura de transición vítrea, y rigidez.

2.5 Características intermoleculares

Las variaciones microestructurales de los polímeros se ven reflejadas en las propiedades mecánicas de los mismos, véase figura 2.7 esfuerzo-deformación para diferentes tipos de polímero a temperatura ambiente.



- a) Polímero de baja ductilidad.
- b) Polímero dúctil.
- c) Polímero dúctil con capacidad de elongación en frío.
- d) Polímero con un largo rango de elasticidad.



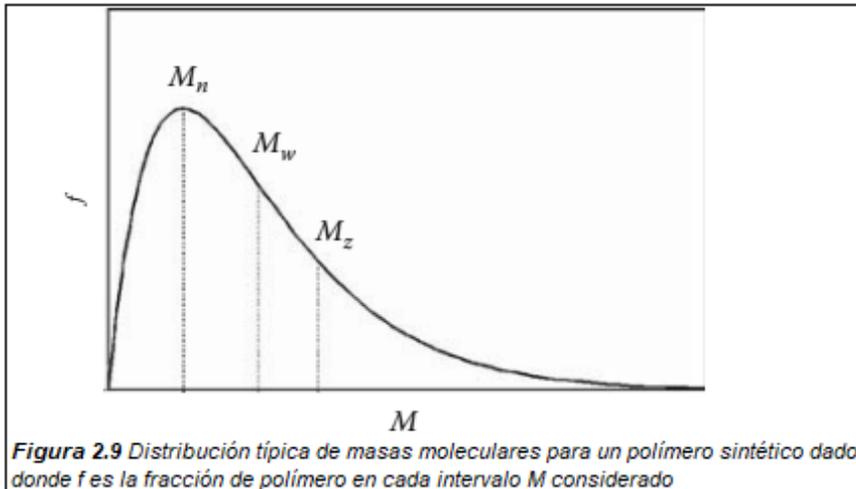
2.6 Por su uso industrial

Existen 5 principales formas de clasificación en la industria: elastómeros (hules), plásticos, fibras, adhesivos, y recubrimientos. La diferencia entre las tres primeras radica básicamente en una propiedad llamada “*modulus*” que en términos coloquiales significa “rigidez” [7]. Los adhesivos y recubrimientos se delinear por su uso final.

2.7 Peso molecular promedio y polidispersidad.

Una de las características más importantes que distinguen un polímero de una molécula simple, es la incapacidad de asignar una masa molar a un polímero. Esto es consecuencia del hecho que en una reacción de polimerización, la longitud de la cadena formada es en gran parte determinada mediante eventos aleatorios. Esto hace que inevitablemente el producto obtenido sea una mezcla de cadenas con diferente longitud, es decir una distribución de longitudes de cadena que generalmente puede ser calculada estadísticamente.

El polímero es caracterizado más por una distribución de masas molares y pesos moleculares promedio que por un peso molecular único.



Por consiguiente existen miles de compuestos con el mismo nombre pero diferente peso molecular, tomando como ejemplo PET se puede separar una muestra de peso molecular 25,000 y otra del mismo material pero encontrarnos con un peso molecular de 150,000 y observar propiedades mecánicas diferentes.

Las reacciones de polimerización pueden producir cadenas poliméricas con diferente número de unidades repetidas (grados de polimerización). Como la mayoría de polímeros sintéticos y algunos naturales se constituyen de moléculas con diferente peso molecular, son llamados *polidispersos*. En contraste, proteínas específicas y ácidos nucleicos constituidos de moléculas con un peso molecular específico son denominadas *monodispersas*.

Ya que las moléculas típicas con grados de polimerización menores que el valor de peso molecular crítico de cadena son débiles, parece ser que ciertas propiedades están relacionadas con el peso molecular. La viscosidad de polímeros amorfos fundidos es dependiente de la distribución de pesos moleculares mientras que la densidad, la capacidad calorífica específica, y el índice de refracción son esencialmente independientes del peso molecular en valores de peso molecular arriba del peso molecular crítico que es típicamente cerca de los 100 grados de polimerización.

Las cadenas de un polímero pueden contener distintas cantidades de unidades monoméricas es decir, se pueden tener por ejemplo dos lotes de polietileno, y ser diferentes dependiendo de características como el *peso molecular promedio en número* que es la relación del peso total de las moléculas entre el número de moléculas (ecuación 1), el *promedio en peso* (ecuación 2), el *peso molecular promedio z* (ecuación 3), el peso molecular viscosimétrico que es el peso molecular que tendría una disolución con todas sus cadenas del mismo peso molecular (ecuación 4), **el Índice de polidispersidad** que es el cociente entre el promedio en peso y el peso molecular promedio **en número** $D=M_w/M_n$, y expresa la distribución de pesos moleculares.[8]

Expresiones de peso molecular promedio donde N_i es el número de moléculas con peso molecular M_i

$$M_N = \frac{\sum M_i N_i}{\sum N_i}$$

Ecuación 1

$$M_w = \frac{\sum M_i^2 N_i}{\sum M_i N_i}$$

Ecuación 2

$$M_z = \frac{\sum M_i^3 N_i}{\sum M_i^2 N_i}$$

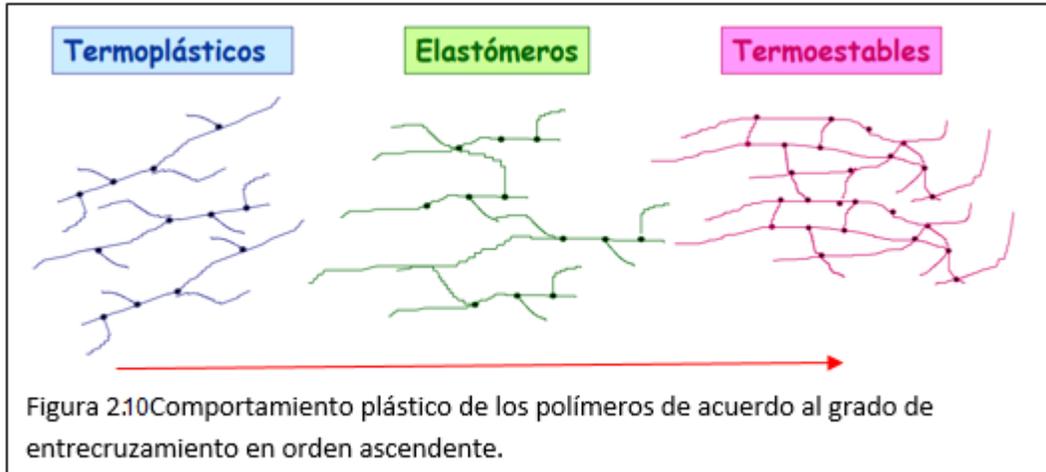
Ecuación 3

$$M_v = \left(\frac{\sum M_i^{1+\alpha} N_i}{\sum M_i N_i} \right)^{1+\alpha}$$

Ecuación 4

2.8 Grado de entrecruzamiento y distribución de pesos moleculares

El grado de entrecruzamiento y la distribución de pesos moleculares (monodispersos, o polidispersos) son parámetros que de igual forma colaboran en la identificación y predicción de comportamientos de los polímeros en la industria y la academia.



Las características intramoleculares determinan las propiedades finales del material y las temperaturas de transición vítrea (T_g) y temperatura de fusión (T_m) quienes a su vez determinan los límites de aplicación de cada material dado.

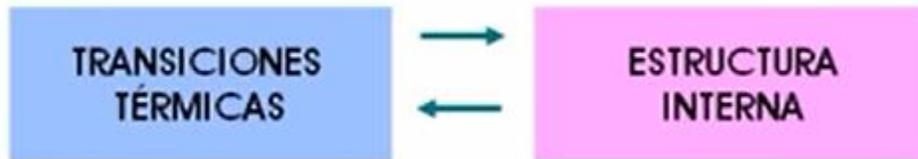
Cabe mencionar también que los plásticos se dividen en dos principales categorías basadas en razones económicas y uso final: *commodity*, y *de ingeniería*. Mientras que los primeros se caracterizan principalmente por su bajo costo de producción, alto volumen de fabricación y aplicaciones de baja demanda mecánica. Los plásticos de ingeniería tienen un mayor costo de producción, mejores propiedades mecánicas y una gran durabilidad de uso.

Por ésta razón es que los plásticos *commodities* han sido producidos en cantidades casi inmensurables destinados en gran cantidad al desecho rápido generando la ya mencionada contaminación aérea, terrestre, y marítima.

2.9 Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión cristalina

T_g y *T_m*.

Dado que las propiedades de los materiales poliméricos se ven afectadas por los cambios de temperatura, es importante mencionar que existen dos puntos de temperatura específicos para determinado material que afectarán de manera relevante las propiedades de dicho polímero, y estas son la temperatura de transición vítrea, y la temperatura de fusión cristalina.



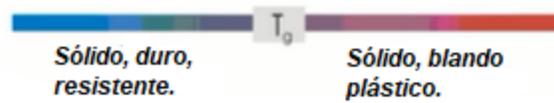
La movilidad de las cadenas poliméricas se encuentra en función de su estructura interna, y es sensible al cambio de temperatura.

Temperatura de transición vítrea

Los polímeros amorfos pueden exhibir dos distintos tipos de comportamientos mecánicos. Algunos como el poliestireno (PS), son plásticos duros, rígidos y vítreos a temperatura ambiente. Otros polímeros como el poliisopreno son materiales suaves y flexibles. Sin embargo, si el PS es calentado alrededor de 125°C, su comportamiento mecánico cambia y exhibe propiedades semejantes a las del hule; por otra parte, si una bola de hule es enfriada en nitrógeno líquido, se torna rígida y vítrea y se rompe al intentar hacerla rebotar. Esto se debe a que existe una temperatura, o un estrecho intervalo de temperaturas, abajo del cual un polímero amorfo se encuentra en un estado vítreo y sobre el cual su estado es similar al del hule. Esta temperatura se conoce como la Temperatura de Transición Vítrea, *T_g*. La temperatura de transición vítrea es una propiedad de los polímeros y si el polímero tiene propiedades vítreas o similares al hule depende de si su temperatura de aplicación está sobre o debajo de su temperatura de transición vítrea [9].

Entonces, la temperatura de transición vítrea (*T_g*) es aquella temperatura bajo la cual un material polimérico adquiere propiedades semejantes a la del vidrio (duro, rígido, y resistente). Es una transición en la cual no hay cambio de estado de agregación, es decir: es una transición sólido-sólido en la cual cualquier polímero

que se encuentre por encima de su T_g mantendrá propiedades de plástico (blando, con capacidad de deformación).



Para entender las bases moleculares de la transición vítrea, los movimientos moleculares que ocurren en una masa de polímero amorfo pueden ser clasificados en cuatro categorías.

1. Movimiento de traslación de moléculas completas, permitiendo el flujo.
2. Retorcimiento y saltos en movimiento cooperativo de segmentos de moléculas aproximadamente de longitud de 40-50 átomos de carbono, permitiendo flexión y desenrollamiento que conduce a manifestar elasticidad.
3. Movimientos de unos pocos átomos a lo largo de la cadena principal (cinco o seis) o de grupos laterales de la cadena principal.
4. Vibraciones de átomos alrededor de posiciones en equilibrio, como ocurre en redes cristalinas, excepto que los centros atómicos no están en un arreglo regular en un polímero amorfo.

Se tiene que a la temperatura de transición vítrea los movimientos de los tipos 1 y 2 no se presentan [10].

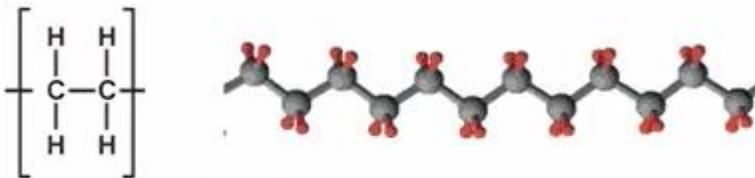
Como se ha mencionado anteriormente, la movilidad de las cadenas poliméricas está ligada a la estructura interna del material polimérico en cuestión, observando así que cuando se trata de estructuras internas complejas como el poliestireno (PS), la posibilidad de movimiento de sus cadenas es restringida, mientras que cuando se trata de cadenas poliméricas sencillas como en el caso del polietileno (PE), la posibilidad de movimiento es elevada. Esta relación permite hacer predicciones cualitativas en cuanto a los valores de T_g pues en general, polímeros con alta movilidad poseen valores de T_g bajos, mientras que los materiales poliméricos con menor movilidad entre sus cadenas internas poseen valores de T_g más elevados.

A continuación se presentan los valores de T_g más comunes en la industria del plástico, cabe mencionar que al tratarse de material reciclado, y aunado a que cada compañía resguarda información acerca del procesado de cada material dentro de la planta, estos valores resultan aproximados, y pueden estar sujetos a cambios.

Nombre del plástico	T_g
Policloruro de vinilo	87°C
Polipropileno copolímero	-20°C
Polipropileno homopolímero	-10°C
Poliestireno	100°C
Tereftalato de polietileno	79°C
Polietileno de alta densidad	-110°C
polietileno de baja densidad	-110°C

Temperatura de fusión cristalina T_m

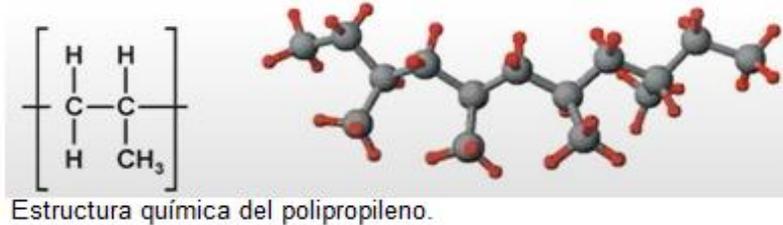
A diferencia de la temperatura de transición vítrea T_g en la cual no existe un cambio de estado de agregación de la materia, la temperatura de fusión cristalina (T_m) es aquella temperatura a la cual determinado polímero cambia de estado de agregación, es decir; es una transición sólido-líquido que se encuentra ligada al ordenamiento de las cadenas poliméricas internas.



Estructura química del polietileno.

De este modo al tomar en consideración un polímero conformado por cadenas simples como en el caso del polietileno, se observa que tiene una alta capacidad de ordenación dando como resultado una alta cristalinidad formando una estructura compacta mientras que moléculas más complejas como el polipropileno tienen una mayor dificultad de ordenamiento, y de formar una estructura compacta.

Las mezclas de polímeros, las cuales son mezclas de dos o más homopolímeros diferentes, son obtenidas durante el proceso de reciclado, suelen exhibir múltiples Tg's y Tm's, una por cada componente de la mezcla, esto redundando negativamente en la fortaleza mecánica del material [11].



Estructura química del polipropileno.

2.10 GRADO DE POLIMERIZACIÓN Y POLIDISPERSIDAD

Polimerización

Se le denomina polimerización al proceso de producción de macromoléculas a partir de unidades más pequeñas mediante enlaces covalentes en la cadena central. Al tamaño de la molécula resultante se le denomina grado de polimerización. Existen dos mecanismos principales para lograrlo: adición (reacción en cadena) y condensación (step growth). En la polimerización en cadena, la reacción se produce espontáneamente y en una sola dirección, en la polimerización de condensación, la reacción no es espontánea y normalmente ocurre lentamente, los monómeros primero forman dímeros, trímeros, tetrámeros, y oligómeros. Se requieren tiempos de reacción largos para alcanzar polímeros con altos pesos moleculares. [12]

Debido al grado de polimerización, polidispersidad y distribución de PM nos encontramos con que existen miles de compuestos con el mismo nombre, y es importante tomar en cuenta las variables involucradas cuando se trata de trabajar con materiales poliméricos, y su reciclaje pues trabajar con ellos es sinónimo de trabajar con una mezcla enorme de pesos moleculares que por lo general dan como resultado productos con baja resistencia mecánica y por lo tanto vida útil reducida.

CAPÍTULO 3

RECICLAJE DE POLÍMEROS

“Una ecología saludable es la base para una economía saludable.”

Claudine Schneider.

3.0 Reciclaje de polímeros

En la década de 1980, el volumen total de plásticos *commodities* consumido en el mundo sobrepasó al de hierro y acero debido a diversas razones, en su mayor parte económicas además de encontrar ventajas en su peso y en general su mayor resistencia a la corrosión convirtiendo a dichos polímeros en materiales indispensables en la industria y la vida cotidiana de ésta década.

Una más de las ventajas que a su vez también representa un perjuicio en estos días a nivel global es la durabilidad de los polímeros sintéticos ya que particularmente se encuentran en abundante circulación útil y de desecho residuos de termoplásticos y termoestables que como se ha mencionado anteriormente, terminan siendo contaminantes directos del medio ambiente. Se ha encontrado una variedad de formas destinadas a lidiar con éste problema tales como fabricar polímeros degradables, quemar polímeros combustibles, reciclarlos, o encontrar formas innovadoras de uso para ellos. [13]

3.1 Código de identificación de plásticos *commodities*.

Debido a la similitud entre algunos materiales y la magnitud de su producción, en 1988 la Sociedad Industrial del Plástico (SPI) introdujo un código de identificación de plásticos para su posterior reciclaje que consiste en un símbolo que contiene un número de acuerdo al material del cual se trate. Actualmente la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) avala el código de identificación mostrado en la figura 3.0 que consta de abreviaturas y el símbolo antes mencionado incluyendo sus posibles aplicaciones a modo sugerencia con la finalidad de facilitar aún más su identificación e incentivar su reproceso.

Termoplásticos			Aplicaciones	Usos después del reciclado
Tereftalato de Polietileno.	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, refuerzos neumáticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos.
Polietileno de Alta Densidad.	PEAD		Botellas para productos alimenticios, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, láminas y tuberías.	Bolsas industriales, botellas para detergente, contenedores, tubos.
Policloruro de Vinilo.	PVC		Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	Muebles de jardín, tuberías, vallas, contenedores.
Polietileno de Baja Densidad.	PEBD		Film adhesivo, bolsas, recubrimiento, contenedores flexibles tuberías para riego.	Bolsas para residuos, tubos, contenedores, film de uso agrícola.
Polipropileno.	PP		Envases para productos alimenticios, cajas, tapones, piezas de automóviles, alfombras.	Cajas múltiples para transporte de envases, sillas, textiles.
Poliestireno.	PS		Botellas, vasos de yogurt, recubrimientos, embalaje de protección.	Aislamiento térmico cubos de basura, accesorios de oficina.

Figura 3.0 Identificación de plásticos commodity código SPI.

Dentro del código SPI encontramos también el símbolo rotulado con el número 7



(otros) , de los que por ejemplo se pueden mencionar el policarbonato (PC), poliamida (PA), y el poliuretano (PU). Sus aplicaciones principales las encontramos en electrodomésticos, artículos para cosmetología, e ingeniería aeroespacial. Estos polímeros se caracterizan por tener una alta resistencia a la

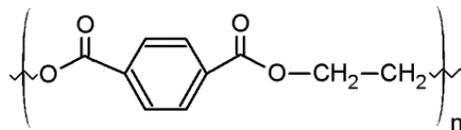
intemperie, alta rigidez y dureza, además de ser buenos aislantes térmicos y eléctricos. Estos polímeros son considerados como no reciclables.

Una vez identificado el material resulta imprescindible tener conocimiento acerca de sus propiedades mecánicas y termodinámicas para de ese modo tomar las consideraciones pertinentes requeridas para poder darle el tratamiento adecuado durante el reproceso.

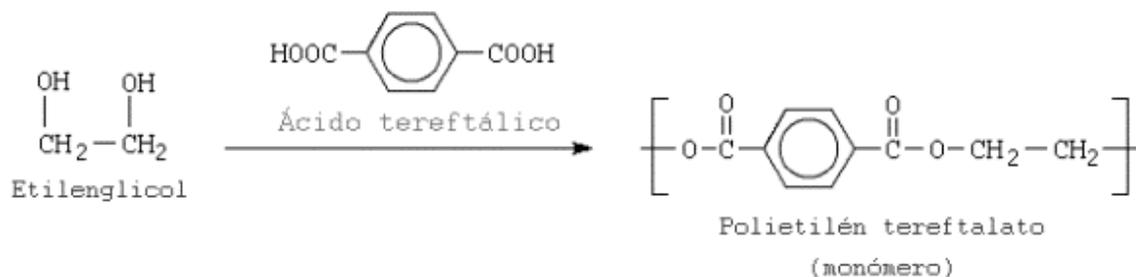
3.2 Características de los plásticos commodities y usos más frecuentes.



3.21 PET



El tereftalato de polietileno o PET por sus siglas en inglés es el plástico commodity de mayor demanda a nivel mundial, se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo.



Dadas sus propiedades mecánicas, y termodinámicas ha sido de gran utilidad a nivel industrial en las industrias de mayor auge actualmente, tales como la industria refresquera, de alimentos, y farmacéutica; cabe mencionar que además de las propiedades antes mencionadas, es utilizado también debido a la eficiencia en su reciclaje pues se ha observado que en una planta de reciclaje típica en Latinoamérica se alcanzan cifras de hasta el 95% de recuperación y formación de

nuevo producto terminado, lo cual se ve reflejado en una reducción importante en costos de embalaje en la industria y contribuye al rescate de material con tiempo de vida útil post consumo (principalmente botellas fabricadas a partir de dicho polímero) que terminaría siendo desechado.

El acopio de PET en México ha sido el más alto de América en los últimos tres años. En 2014, el consumo aparente nacional de PET virgen para envases rodeó las 700,000 toneladas, de las cuales se recuperaron 57.8%. De lo acopiado en el país, 46.2% se valorizó y se comercializó en México, mientras que 56.8% fue a exportación, principalmente a China y a Estados Unidos. Así mismo, se destaca, que México es líder mundial en reciclado botella a botella grado alimenticio, con 57%, seguido por Estados Unidos con 22% y por la Unión Europea, con 22%.

ANEXO II



3.22 PEAD/HDPE

El polietileno de alta densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos. Su fórmula condensada es $(-CH_2-CH_2-)_n$.

Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como HDPE (por sus siglas en inglés, *High Density Polyethylene*) o PEAD (*Polietileno de Alta Densidad*). Este material se utiliza, entre otras cosas, para la elaboración de envases plásticos desechables de detergentes y fluidos espesos.

El polietileno de alta densidad se obtiene por adición, es decir, sumando distintas unidades de etileno. Dado que sus moléculas presentan escasas ramificaciones, el HDPE posee una densidad molecular considerable que se traduce en una gran resistencia y dureza, así como una mayor tolerancia a las altas temperaturas. Esta característica es, a su vez, la principal diferencia entre el polietileno de alta densidad y el de baja densidad.

Características y propiedades

La rigidez y resistencia del polietileno son sus principales ventajas. Se trata de un material resistente a los impactos, a la tracción y a las temperaturas altas y bajas. Su resistencia no solo es física, ya que no se ve atacado por los ácidos o solventes.

Se trata de un material incoloro y casi opaco. Su facilidad para imprimir, pintar y pegar sobre él permite un amplio abanico de opciones de personalización. Se trata, además de un material muy fácil de procesar mediante métodos como inyección o extrusión. El polietileno de alta densidad es un material reciclable especialmente mediante el proceso mecánico y térmico.

El polietileno de alta densidad es un polímero que se caracteriza por:

1. Excelente resistencia térmica y química.
2. Muy buena resistencia al impacto.
3. Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
4. Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
5. Es flexible, aún a bajas temperaturas.
6. Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
7. Presenta facilidad para imprimir, pintar o pegar sobre él.
8. Es muy ligero.
9. Su densidad se encuentra en el entorno de 0.940 - 0.970 g/cm³.
10. No es atacado por los ácidos, se considera una resistencia máxima de 60°C de trabajo para los líquidos, pues a mayor temperatura la vida útil se reduce. Otros termoplásticos ofrecen mejor resistencia a mayores temperaturas.

Aplicaciones y usos

Las propiedades del polietileno de alta densidad, tales como su resistencia a las altas y bajas temperaturas permiten la fabricación de tuberías para fluidos y contenedores geotérmicos de HDPE/PEAD. A su vez, al ser capaz de albergar productos químicos de distinto tipo, es muy común encontrarlo en garrafas para productos de limpieza o higiene. También es frecuente encontrar envases y tapones para medicamentos, y cosméticos fabricados en polietileno de alta densidad.

El consumo aparente de polietileno de alta densidad PEAD/ HDPE durante el año 2020 fue de 1 millón 202 mil toneladas. En tanto que la producción de HDPE con material reciclado fue de 793 mil toneladas. Por lo que una estimación rápida indicaría que se recicló un máximo del 66% del HDPE consumido [14].



3.23 Cloruro de polivinilo PVC

El cloruro de polivinilo (PVC) cuya fórmula química es $(C_2H_3Cl)_n$, es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo.[15] Es el derivado del plástico más versátil. Se puede producir mediante cuatro procesos diferentes: suspensión, emulsión, masa y solución.

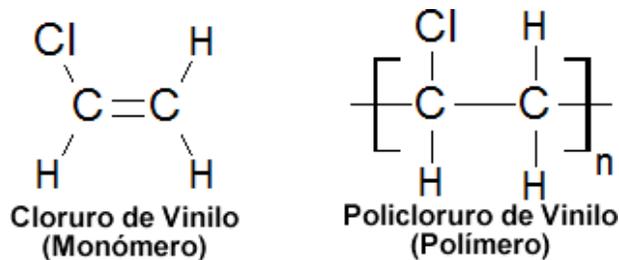
Se presenta en su forma original como un material blanco, amorfo y opaco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. Es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetano. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.

Se obtiene a partir del craqueo del petróleo, que consiste en romper los enlaces químicos del compuesto para conseguir diferentes propiedades y usos. Lo que se obtiene es el etileno, que combinado con el cloro obtenido del cloruro de sodio

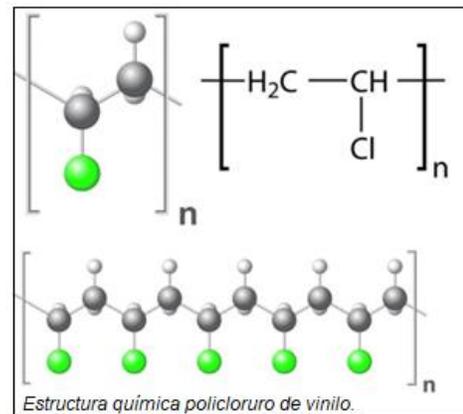
producen etileno diclorado, que pasa a ser luego cloruro de vinilo. Mediante un proceso de polimerización llega a ser cloruro de polivinilo o PVC. Antes de someterlo a procesos para conformar un objeto el material se mezcla con pigmentos y aditivos como estabilizantes o plastificantes, entre otros.

Al ser un polímero obtenido a partir de dos materias primas naturales cloruro de sodio o sal común (ClNa) (57%) y petróleo o gas natural (43%), es por lo tanto menos dependiente de recursos no renovables que otros plásticos

Estudios realizados por el Centro de Ecología y Toxicología de la Industria Química Europea (ECETOC), señalan que la producción de PVC se realiza sin riesgos para el medio ambiente.[16]



El átomo de cloro enlazado a uno de cada dos átomos de carbono le confiere características amorfas principalmente impiden su recristalización, la alta cohesión entre moléculas y cadenas poliméricas del PVC se deben principalmente a los momentos dipolares fuertes originados por los átomos de cloro, los cuales a su vez dan cierto impedimento estérico es decir que repelen moléculas con igual carga, creando repulsiones electrostáticas que reducen la flexibilidad de las cadenas poliméricas, esta dificultad en la conformación estructural hace necesario la incorporación de aditivos para ser obtenido un producto final deseado.



En la industria existen dos tipos:

- Rígidos: utilizados en la producción de envases, ventanas, tuberías, las cuales han reemplazado en gran medida al hierro (que se oxida más fácilmente).
- Flexibles: cables, juguetes, calzados, pavimentos, recubrimientos.

El PVC se caracteriza por ser dúctil y tenaz; presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental.

Propiedades y características

- Tiene una elevada resistencia a la abrasión, debido al cloro que forma parte del polímero PVC, no se quema con facilidad ni arde por si solo y cesa de arder una vez que la fuente de calor se ha retirado. Además cuenta con buena resistencia mecánica y al impacto por lo que se emplea eficazmente para aislar y proteger cables eléctricos en el hogar, oficinas y en las industrias. Los perfiles de PVC empleados en la construcción para recubrimientos, cielorrasos, puertas y ventanas, tienen también esta propiedad de ignífugos.[17]
- Al utilizar aditivos tales como estabilizantes, plastificantes entre otros, el PVC puede transformarse en un material rígido o flexible, característica que le permite ser usado en un gran número de aplicaciones.
- La densidad del PVC es de entre 1.3g/cm^3 a 1.4 g/cm^3 depende de sus características y propiedades.
- Se emplea eficazmente para aislar y proteger cables eléctricos en el hogar, oficinas y en las industrias debido a que es un buen aislante eléctrico.
- Se vuelve flexible y moldeable sin necesidad de someterlo a altas temperaturas (basta unos segundos expuesto a una llama) y mantiene la forma dada y propiedades una vez enfriado a temperatura ambiente, lo cual facilita su modificación.

- Alto valor energético. Cuando se recupera la energía en los sistemas modernos de combustión de residuos, donde las emisiones se controlan cuidadosamente, el PVC aporta energía y calor a la industria y a los hogares.
- Amplio rango de durezas
- Es muy resistente a la corrosión
- Es inodoro, insípido e inodoro, además de ser resistente a diversos agentes químicos.
- No se degrada, ni se disuelve en agua, además de ser totalmente reciclable.
- Es estable e inerte. Se emplea extensivamente donde la higiene es una prioridad. Los catéteres y las bolsas para sangre y hemoderivados están fabricadas con PVC.
- Es un material excepcionalmente resistente. Los productos de PVC pueden durar hasta más de sesenta años como se comprueba en aplicaciones tales como tuberías para conducción de agua potable y sanitarios; de acuerdo al estado de las instalaciones se espera una prolongada duración de las mismas. Una evolución similar ocurre con los marcos de puertas y ventanas en PVC.

En 2021 en México se reciclaron un millón 913 mil toneladas de residuos plásticos, hecho que colocó al país como uno de los principales en materia de acciones de economía circular en América Latina. Sin embargo, en el caso del PVC el consumo anual es de poco más de 600mil toneladas, de esta cantidad, la recuperación de PVC asciende únicamente a 2.1 por ciento, es decir, 12mil 600 toneladas de PVC fueron recicladas. Por lo que en materia de reciclado de policloruro de vinilo hay mucho por hacer [18].



3.24 PEBD/LDPE

Es un polímero termoplástico que de igual manera es conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, *Low Density Polyethylene*) o como PEBD, en español. Sin embargo, el polietileno de baja densidad en contraste con el HDPE es un polímero con una estructura de cadenas muy ramificadas; esto da como resultado que tenga una densidad más baja que la del HDPE (0,92-0,94 g/cm³).[19]

Características principales

El polietileno de baja densidad es un polímero que se caracteriza por:

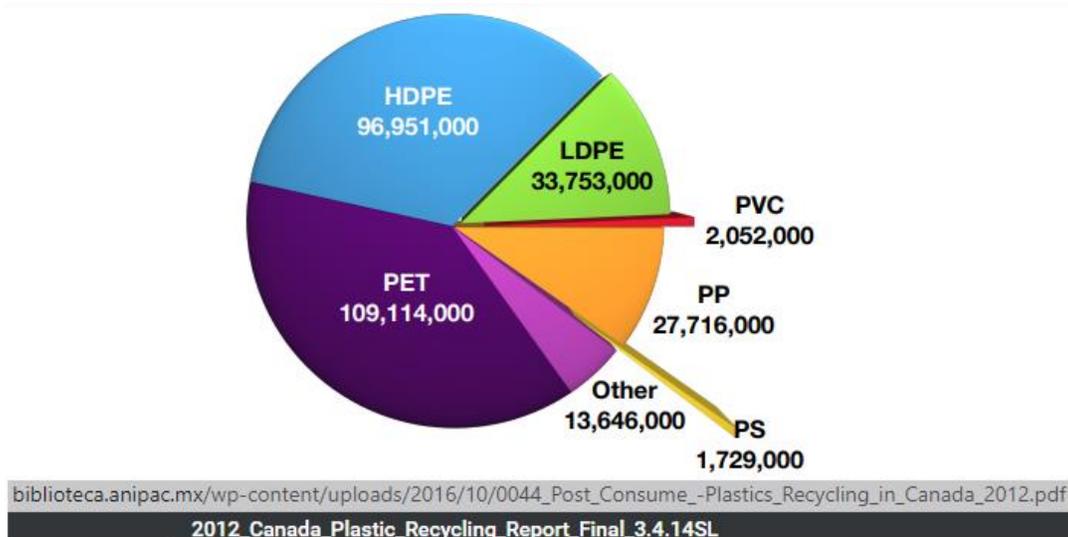
- Buena resistencia térmica y química. Puede soportar temperaturas de 80 °C de forma continua y 95 °C durante un corto período de tiempo.
- Buena resistencia al impacto
- Es de color lechoso, puede llegar a ser transparente dependiendo de su espesor.
- Se puede procesar por métodos de conformado como inyección y extrusión.
- Es más flexible que el polietileno de alta densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.

Entre algunas de sus aplicaciones se encuentran:

- Bolsas plásticas
- Película para invernaderos y otros usos agrícolas
- Base para pañales
- Película para emplayar.

Datos publicados del reciclaje en Canadá muestran que, del total de polietileno reciclado, el LDPE constituye aproximadamente el 26%, o sea, menos de la

tercera parte de lo que se recicla de HDPE [20]. En México no se encontraron datos al respecto.



Sin embargo, se sabe que al año 2018, previo a la Pandemia por Covid 19, el consumo nacional aparente de polietileno de baja densidad en México fue de 1 millón 535 mil toneladas, de los cuales aproximadamente 98% se destina a la elaboración de película. Este dato demuestra que el consumo de PEBD/LDPE en nuestro país constituye un volumen importante, por lo que es de suma importancia conocer datos de reciclado para este material con el objetivo de fortalecer su recolecta y reciclado y así disminuir el volumen de importación [21].

En el 2019, el volumen de producción presentó un decrecimiento de (-)70.4% respecto con el 2018, las importaciones descendieron (-) 73.02%; mientras que, las exportaciones reportaron un avance de 38.39%, finalmente, el consumo nacional aparente decreció 89.31 por ciento.

Polietileno de baja densidad (Toneladas)									
Años	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Producción*	459,831	485,984	470,744	437,530	419,465	430,479	376,305	503,000	1,250,723
Importación**	368,182	351,151	372,599	392,741	390,219	443,303	404,759	296,006	402,730
Exportación**	52,941	87,890	61,713	72,080	72,471	76,281	88,158	170,892	118,488
Consumo Nacional Aparente	775,071	749,245	781,630	758,191	737,213	797,501	692,906	628,114	1,534,965

Fuente: *Elaboración con base en información de ANIQ.
** Con base en el Sistema de Información de Comercio Exterior (SICM) de la Secretaría de Economía.



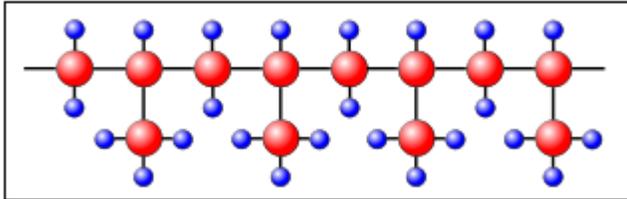
3.25 Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno. Cuenta con una gran resistencia contra diversos solventes químicos, así como contra álcalis (conjunto de sustancias obtenidas a partir de metales alcalinos), y ácidos, es un polímero de reacción en cadena (adición).[22]

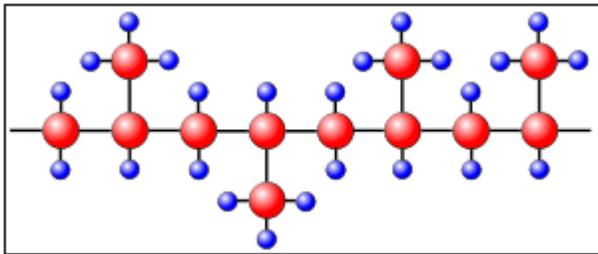
Cuenta con una versatilidad superior a la de otros plásticos commodity en cuanto a manejo y procesamiento, resiste la acción de muchos solventes químicos, y además es uno de los materiales más utilizados en el embalaje para alimentos y farmacia. Sin embargo, es un polímero de bajo nivel de reciclaje debido a la dificultad de separación de PP proveniente de embalaje de consumo y de no consumo.

Tacticidad en el PP

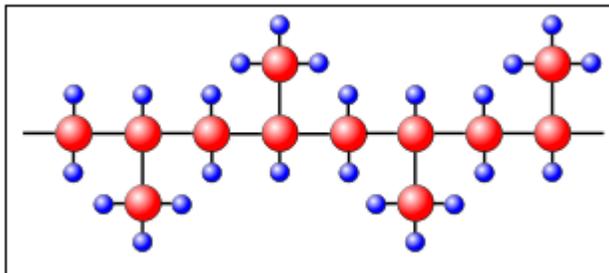
Las moléculas de PP se componen de una cadena principal de átomos de carbono enlazados entre sí, de la cual cuelgan grupos metilo (CH_3 -) a uno u otro lado de la cadena. Cuando todos los grupos metilo están del mismo lado se habla de "polipropileno isotáctico"



Cuando están alternados a uno u otro lado, de "polipropileno sindiotáctico"



Cuando no tienen un orden aparente, de "polipropileno atáctico".



Las propiedades del PP dependen en gran parte del tipo de tacticidad que presenten sus moléculas.

Existen dos tipos principales de polipropileno presentes en la industria: homopolímeros y copolímeros.[23]

Los copolímeros se dividen además en copolímeros de bloque y copolímeros aleatorios, y es esta diferencia estructural la que determina su aplicación industrial más adecuada.

Es común escuchar que en la industria al propileno se le denomina el acero de la industria plástica ya que cuenta con diversas formas de modificación con el objetivo de cumplir mejor algún propósito específico. Esto se logra generalmente mediante la utilización de aditivos especiales o una fabricación particular.

PP homopolímero

Se denomina homopolímero al PP obtenido de la polimerización de propileno puro.

A baja temperatura el PP homopolímero se vuelve frágil (típicamente en torno a los 0 °C); no tanto el PP copolímero, que conserva su ductilidad hasta los -40 °C.

- PP isotáctico. La distribución regular de los grupos metilo le otorga una alta cristalinidad entre 70 y 85%, gran resistencia mecánica y gran tenacidad. Es el tipo más utilizado hoy día en inyección de piezas (tapa-roscas, juguetes, contenedores, etc.) y en extrusión de película plana para fabricar rafia o como papel de envoltura, sustituto del celofán.
- PP atáctico. Material de propileno que polimeriza dejando los metilos laterales espacialmente en desorden tal como se muestra en la figura. Este polímero tiene una "pegajosidad" tal que permite adherirse en superficies aún en presencia de polvo, por lo cual se utiliza como una goma en papeles adheribles, o como base para los adhesivos en fundido ("hot melt" o barras de "silicón").
- PP sindiotáctico. Muy poco cristalino, teniendo los grupos metilos acomodados en forma alterna, lo cual le hace ser más elástico que el PP isotáctico pero también menos resistente.

PP copolímero

Al añadir entre un 5 y un 30% de etileno en la polimerización se obtiene un copolímero que posee mayor resistencia al impacto que el PP homopolímero. Existen, a su vez, dos tipos:

- Copolímero aleatorio. Los monómeros de etileno y propileno se introducen a la vez en un mismo reactor, resultando cadenas de polímero en las que ambos monómeros se alternan de manera aleatoria.
- Copolímero en bloques. En este caso primero se lleva a cabo la polimerización del propileno en un reactor y luego, en otro reactor, se añade etileno que polimeriza sobre el PP ya formado, obteniéndose así cadenas con bloques homogéneos de PP y PE. La resistencia al impacto de estos copolímeros es muy alta, por lo que se les conoce como PP impacto o PP choque.

Cuando el porcentaje de etileno supera un cierto valor, el material pasa a comportarse como un elastómero, con propiedades muy diferentes del PP convencional. A este producto se le llama caucho etileno-propileno (EPR, del inglés Ethylene-Propylene Rubber).

- Terpolímero EPDM. Cuando se agrega un tercer componente del tipo dieno (Butadieno, por ejemplo) el resultado es un elastómero o hule de Etileno-Propileno, denominado EPDM.

El PP tiene un grado de cristalinidad intermedio entre el polietileno de alta y el de baja densidad.

Aplicaciones

Los métodos comunes de extrusión de polipropileno incluyen la producción de largos rollos de este material para su futura conversión en una amplia gama de productos útiles, tales como mascarillas, filtros, pañales y toallitas húmedas.

La técnica más empleada es el moldeo por inyección, que se utiliza para obtener

productos como como vasos, cubiertos, copas, tapas, envases, utensilios domésticos y piezas de automóviles. No obstante, podemos encontrar en el mercado piezas fabricadas mediante otros métodos con diferentes aplicaciones, tales como:

- **Moldeo por inyección** de una gran diversidad de piezas, desde juguetes hasta parachoques de automóviles.
- **Moldeo por soplado** de recipientes huecos como por ejemplo botellas o depósitos de combustible.
- **Termoformado** de, por ejemplo, contenedores de alimentos. En particular se utiliza PP para aplicaciones que requieren resistencia a alta temperatura (microondas) o baja temperatura (congelados).
- **Producción de fibras**, tanto tejidas como no tejidas.
- **Extrusión** de perfiles, láminas y tubos.
- **Impresión 3D**, recientemente se ha empezado a usar en formato de filamento para la impresión 3D FDM.

Otra de las características importantes del polipropileno es su buena procesabilidad, evita el traspaso de humedad, además cuenta con buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia, por ello gran parte de los grados de PP son aptos para contacto con alimentos y una minoría puede ser usada en aplicaciones médicas (mallas quirúrgicas para tratamiento de hernias), o farmacéuticas.

Debido a la corta vida útil de los envases fabricados en polipropileno, la mayoría de estos termoplásticos terminan en vertederos como residuos debido a la ausencia de demanda para su reciclaje. Cabe mencionar que la separación de polipropileno además de su rotulación con el respectivo sello, puede ser basada en la densidad del polipropileno que permite que flote mientras que otros polímeros tales como el PVC se hundirán.[24]

El consumo aparente de polipropileno en México se reporta de 1 millón 372 mil toneladas, en tanto que la cantidad reciclada de este material fue de 18.2% de un total de 1 millón 913 mil 710 toneladas de plásticos reciclados, es decir, 348 mil 295 toneladas de polipropileno fueron recicladas, lo cual significa que solo 25.4% del polipropileno consumido se recicla [25,26] Adicionalmente, se reporta que la producción anual de polipropileno en México es realizada por una única empresa y es de 590 mil toneladas anuales [27]. Tomando en cuenta el volumen reciclado y el consumo total aparente, se importan 433 mil 705 toneladas de polipropileno por lo que existe un déficit importante en el reciclado de este polímero, lo que constituye una gran oportunidad empresarial para la industria del reciclado.



3.26 Poliestireno

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno. Existen tres tipos principales en el mercado: el PS cristal, que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto, resistente y opaco, y el poliestireno expandido, muy ligero. Las aplicaciones principales del PS choque y el PS cristal son la fabricación de envases mediante extrusión-termoformado, y de objetos diversos mediante moldeo por inyección. La forma expandida se emplea principalmente como aislante térmico en construcción.

Con una demanda mundial de unos 13 millones de toneladas al año, el poliestireno es hoy el cuarto plástico más consumido, por detrás del polietileno, el polipropileno y el PVC.[28]

Poliestireno cristal

El producto de la polimerización del estireno puro se denomina poliestireno cristal o poliestireno de uso general. Es un sólido transparente, duro y frágil. Es vítreo por

debajo de 100 °C pero por encima de esta temperatura es fácilmente procesable y puede dársele múltiples formas.

El peso molecular promedio del poliestireno comercial varía entre 100.000 y 400.000 g mol⁻¹. Cuanto menor es el peso molecular, mayor es la fluidez y por tanto la facilidad de uso del material, pero menor es su resistencia mecánica.

Las moléculas de poliestireno formadas en los procesos industriales actuales son muy lineales. El poliestireno cristal es completamente atáctico; es decir: los grupos fenilo se distribuyen a uno u otro lado de la cadena central, sin ningún orden particular. Por ello se trata de un polímero completamente amorfo (es decir, no cristalino).

Para mejorar la resistencia mecánica del material, se puede añadir en la polimerización hasta un 14% de caucho (casi siempre polibutadieno). El producto resultante se llama poliestireno de alto impacto (HIPS, High Impact Polystyrene, siglas en inglés). Es más fuerte, no quebradizo y capaz de soportar impactos más violentos sin romperse. Su inconveniente principal es su opacidad, si bien algunos fabricantes venden grados especiales de poliestireno choque translúcido.[29]

El poliestireno de alto impacto (*high-impact polystyrene* o HIPS, en inglés) consiste en una matriz de poliestireno cristal en la cual están dispersas partículas microscópicas de caucho, casi siempre polibutadieno.

Poliestireno expandido

Otro miembro de esta familia es el poliestireno expandido (EPS, siglas en inglés). Consiste en 95% de poliestireno y 5% de un gas que forma burbujas que reducen la densidad del material. Su aplicación principal es como aislante en construcción y para el embalaje de productos frágiles.

A partir de poliestireno cristal fundido se puede obtener, mediante inyección de gas, una espuma rígida denominada poliestireno extruido (XPS). Sus propiedades

son similares a las del EPS, con el cual compite en las aplicaciones de aislamiento.

Propiedades

El poliestireno "compacto" (sin inyección de gas en su interior) presenta la conductividad térmica más baja de todos los termoplásticos. Las espumas rígidas de poliestireno XPS presentan valores aún más bajos de conductividad, incluso menores de $0,03 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, por lo que se suele utilizar como aislante térmico y eléctrico ya que tiene muy baja conductividad eléctrica (típicamente de $10^{-16} \text{ S m}^{-1}$). Sin embargo, tiene relativamente poca resistencia a la temperatura, ya que reblandece entre 85 y 105°C.

Propiedades ópticas

Mientras que el PS choque es completamente opaco, el PS cristal es transparente. Tiene un índice de refracción en torno a 1,57, similar al del policarbonato y el PVC.

Las mezclas de PS choque y cristal son más translúcidas pero también más frágiles cuanto más PS cristal contienen. Es posible encontrar un compromiso entre ambas propiedades de forma que los objetos fabricados, por ejemplo vasos desechables, sean transparentes a la vez que aceptablemente resistentes. [30]

Aplicaciones

Las ventajas principales del poliestireno son su facilidad de uso y su coste relativamente bajo. Sus principales desventajas son su baja resistencia a la alta temperatura (se deforma a menos de 100°C, excepto en el caso del poliestireno sindiotáctico) y su resistencia mecánica modesta. Estas ventajas y desventajas determinan las aplicaciones de los distintos tipos de poliestireno.

- El poliestireno choque se utiliza principalmente en la fabricación de objetos mediante moldeo por inyección. Algunos ejemplos: carcasas de televisores, impresoras, puertas e interiores de frigoríficos, maquinillas de afeitar desechables,

juguetes. Según las aplicaciones se le pueden añadir aditivos como por ejemplo sustancias ignífugas o colorantes.

- El poliestireno cristal se utiliza también en moldeo por inyección allí donde la transparencia y el bajo coste son importantes. Ejemplos: cajas de CD, perchas, cajas para huevos. Otra aplicación muy importante es en la producción de espumas rígidas, denominadas a veces "poliestireno extruido" o XPS, a no confundir con el poliestireno expandido EPS. Estas espumas XPS se utilizan por ejemplo para las bandejas de carne de los supermercados, así como en la construcción.
- En Europa, la mayor aplicación del poliestireno es la elaboración de envases desechables mediante extrusión-termoformado. En estos casos se suele utilizar una mezcla de choque y de cristal, en proporción variable según se desee privilegiar la resistencia mecánica o la transparencia. Un mercado de especial importancia es el de los envases de productos lácteos, que aprovechan una propiedad casi exclusiva del poliestireno: su secabilidad. Es esto lo que permite separar un yogur de otro con un simple movimiento de la mano.
- La forma expandida (poliestireno expandido) se utiliza como aislante térmico y acústico.
- Por sus propiedades, también se emplea en diversos casos en la indumentaria deportiva, por ejemplo, por tener la propiedad de flotar en agua, se usa en la fabricación de chalecos salvavidas y otros artículos para los deportes acuáticos; o por sus propiedades ligeras y amortiguadoras, se usa en la fabricación de cascos de ciclismo.
- Este material también se utiliza como aglutinante en ciertos explosivos como el RDX y en el Napalm (por ejemplo en el MK77).

El Proceso de producción más utilizado en la actualidad para el poliestireno se basa en la polimerización radical en masa "Radical", significa que la reacción es iniciada por radicales libres, generados bien térmicamente bien mediante moléculas específicas denominadas iniciadores. "En masa" significa que el medio de reacción está formado esencialmente por estireno y poliestireno, añadiéndose a veces otro hidrocarburo inerte perfectamente miscible con el estireno, a menudo etilbenceno, que sirve para moderar la velocidad de reacción.

El consumo aparente de resina de poliestireno en México es de 500mil toneladas anuales, en tanto que la producción nacional es de 417mil toneladas por año, el déficit se cubre mediante importaciones. Por otra parte, de la producción nacional el 29.97%, 125mil toneladas, se destina a la producción de polietileno expandido, pero de esta cantidad, únicamente el 1% se recicla, lo que sugiere gran potencial para el desarrollo de la industria del reciclaje [31].

3.3 Procesamiento de plásticos commodities.

El reciclaje consta de técnicas de gestión de residuos sólidos para uso o reproceso de materiales para la obtención de nuevos productos posterior a su vida útil, ambientalmente más deseable que el vertido en basureros.

Mediante el reciclaje se pretende preservar los recursos naturales, evitar focos de contaminación, alargar la vida útil de rellenos sanitarios, e industrialmente reducir los costos de producción de nuevos productos.

Hasta principios de los años 1990s casi 90% de éstos materiales poliméricos se enterraban y alrededor del 10% eran incinerados [32].

Técnicamente el reciclaje de polímeros incluye plantas de reciclaje y desperdicio post-consumidor. El reciclaje en planta involucra el remolido y refundido de todo el material polimérico que nunca dejó la planta en producto terminado y el reproceso

de desperdicio post-consumidor que incluye todos los materiales poliméricos que fueron desechados y recuperados una vez abandonada la planta.

El reciclaje de los plásticos commodities es aplicable solo cuando el coste energético del proceso de reciclado es inferior al de producción de nuevos materiales. Sin embargo esto no debe llevarnos a tomar acciones precipitadas ya que si los plásticos nuevos derivados del petróleo son más económicos que los provenientes del material reciclado, fuera de llevarnos a abandonar las técnicas de reciclado, nos hace una invitación a observar que el precio del crudo está aún demasiado bajo a la vista de su naturaleza finita. Esto fomenta que se aumente el desperdicio en lugar de retomarlos para su reproceso afectando directamente al ecosistema y a la economía en el mediano-largo plazo.

3.4 Dificultades de reciclaje de plásticos commodities.

Cuando materiales como el vidrio y el aluminio son reciclados, se pueden convertir esencialmente en los mismos productos repetidamente, sin embargo esto en muchos casos no es así con los materiales poliméricos dada su diversidad y las diferentes propiedades reológicas que poseen.

Una de las principales medidas que se deben tomar para el correcto reciclaje de plásticos *commodity* es precisamente su correcta identificación en planta con la simbología antes mencionada ya que de ésta forma se toman en cuenta posibles dificultades en las propiedades de cada material, como ejemplo podemos tomar un par de botellas, la primera hecha de cloruro de polivinilo (PVC), y una segunda hecha a partir de tereftalato de polietileno (PET). Son botellas similares a simple vista, sin embargo químicamente son muy diferentes, y en dado caso de ser confundidas y mezcladas en un reproceso, se alterarán significativamente las propiedades del nuevo material.

3.5 Descripción de etapas típicas de reciclaje de plásticos commodities en planta en Latinoamérica.

Cabe la aclaración de que, en el diseño de plantas de baja capacidad, una de las labores del Ingeniero Químico es la de tomar como base las características del material a reciclar y seleccionar el tipo de equipo para cada etapa y mediante la producción deseada cuantificar la cantidad de equipos necesarios de entre los modelos ya existentes en el mercado. En tanto que, al tratarse de empresas de gran producción, el Ingeniero Químico especificará el tipo de equipos necesarios, tomando en cuenta las características del material a reciclar, tomando como base la producción deseada, será el Ingeniero Mecánico el que dimensionará el equipo a construir específicamente para satisfacer la demanda de producción.

En Latinoamérica los plásticos commodities post-consumidor son recolectados en planta provenientes de centros de acopio, personas físicas, y basureros, por lo que una dificultad alterna a la mencionada anteriormente es el costo de separación que en la mayoría de los casos es manual, mismo que se suma al costo de embarque de voluminosas pacas de botellas vacías para reproceso.



Figura 4.0 Pacas de botellas vacías de PET para reproceso.

Esta separación se lleva a cabo tanto por diversidad de materiales como por colores. La razón principal para ello es tener una anticipación a las necesidades a

cubrir del nuevo producto terminado pues una mezcla de diferentes colores puede representar una alteración en el color final de la nueva pieza a fabricar.

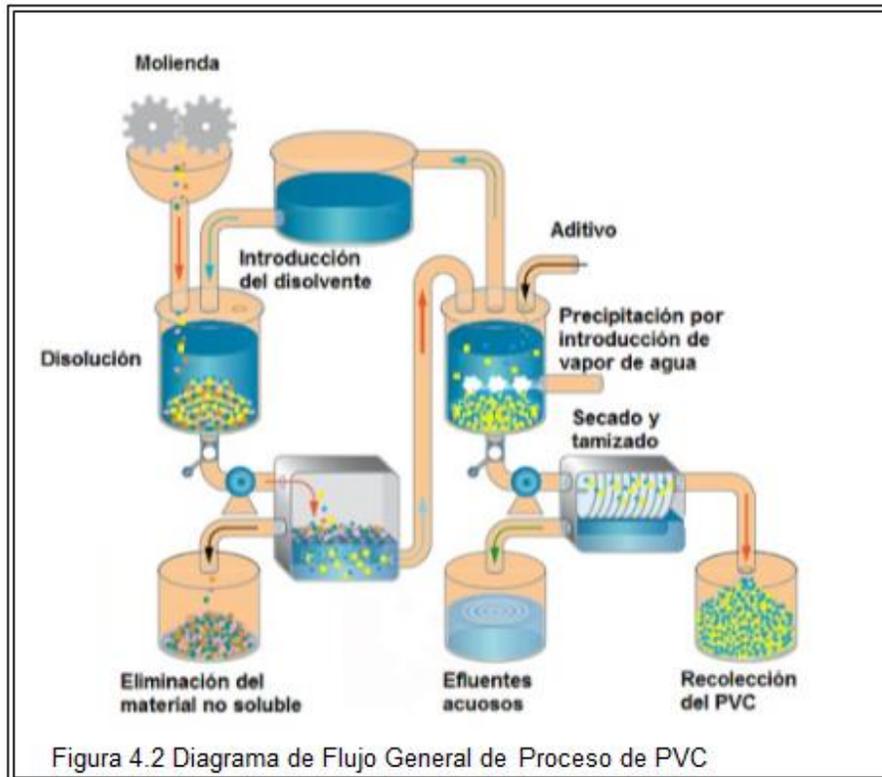


La necesidad de una nueva cultura social de reciclaje en donde se tenga en claro la forma de separación de materiales, y se considere la posibilidad de reutilización de algunos objetos con vida útil post-consumo es otra herramienta útil para alcanzar mayores cifras de reciclaje. [33]

Cada polímero tiene sus propios retos a vencer en términos de reciclaje, por ejemplo, en el caso del PET y PVC, aunque el proceso medular es semejante, se encuentran diferencias sustanciales en su reproceso.

El PET es considerablemente sencillo de reprocesar pues una vez recibido en planta, es separado por colores, pelletizado, y lavado para su posterior proceso de fundición.

Mientras que por otra parte el PVC tiene mayor complejidad de reprocesado, en primera instancia porque rara vez es utilizado sin mezclar. Generalmente, el PVC comercial es tratado con antioxidantes, agentes colorantes, plastificadores y aditivos para hacerlo resistente a la luz ultravioleta. El PVC también requiere más energía de proceso para fabricarse que cualquiera de los termoplásticos principales. La figura 4.2 [34] muestra un diagrama de flujo resumido del proceso.



Los plásticos que no se reciclan se devuelven al ecosistema. Muchos de los polímeros generalmente son “benignos”, pero los colorantes y los plastificadores en los mismos pueden contener toxinas, incluyendo plomo y cadmio.

3.51 Reciclado mecánico

El reciclado mecánico consiste en aumentar las condiciones de temperatura y presión tales que permitan moldear el termoplástico para conseguir nuevos productos (*figura 4.1*).

Proceso del reciclado mecánico

Aunque éste proceso puede efectuarse repetidamente, es preciso mencionar que en cada ensayo se perderán entre 5%-10% de las propiedades mecánicas del polímero. Por ésta razón deben restituirse dichas propiedades mediante el uso de aditivos. Una técnica utilizada en la industria para restituir en diferentes porcentajes las propiedades de los plásticos commodities es realizar mezclas con

material de mejor calidad, o material virgen de ser posible, generando esto un costo adicional de acuerdo a la demanda del cliente a quién se le consulta para aprobación.

A continuación se describen las etapas típicas de un proceso de reciclado en México.

3.52 Separación de plásticos

El reciclaje de plásticos commodities en la actualidad resulta semejante alrededor del mundo, sin embargo en algunos países actualmente considerados en vías de desarrollo como México, y Latinoamérica en general, no se cuenta con las mismas posibilidades tecnológicas que permitirían el uso de equipos especializados para determinada función. Tal es el caso en la separación, y por ello se ha optado por encontrar adaptaciones al proceso que permitan prescindir de determinada maquinaria y proceder de maneras alternas para conseguir resultados semejantes al de países industrializados con altos estándares de calidad.



Figura 5.0 separación manual de plásticos commodities para reproceso.

Separación manual

El personal de trabajo en planta previamente capacitado se encarga de separar los diferentes tipos de botellas en diferentes contenedores con ayuda de una banda transportadora alimentada con ayuda de un montacargas.

Antes de comenzar el proceso de separación es preciso especificar las condiciones bajo las cuales el plástico de acopio será aceptado. Estas especificaciones tienen como objetivo reducir el costo de separación y por ende de proceso general ya que en muchas ocasiones el plástico proveniente de tiraderos o centros de acopio viene mezclado con materiales no reciclables o simplemente no entran en la categoría de plásticos con los que determinada planta trabaja.

Asimismo, en ocasiones al provenir de tiraderos se encuentran grandes cantidades de impurezas no plásticas como material orgánico, tierra, o material metálico, siendo éste último el material de mayor riesgo en la planta pues existe el riesgo de que la maquinaria en algún punto del proceso resulte averiada reflejándose directamente en los tiempos de producción y representando costos de mantenimiento.

Por ello, el material de acopio recibe una primera inspección de calidad al ingresar a la planta. En países industrializados esta inspección de calidad no resulta estrictamente rigurosa dada la existencia de equipos separadores de material metálico mediante medios magnéticos. Es también en países industrializados en donde frecuentemente se cuentan con equipos separadores por tamaño de material recibido *“Trommel”*.



Figura 5.1 Trommel.

Mecanizado

Más frecuentemente utilizado en países industrializados donde las botellas son separadas mediante bandas transportadoras y sensores térmicos, espectroscopios infrarrojos, entre otros. La técnica basada en espectroscopia IR es muy efectiva y ha alcanzado gran escala comercial.

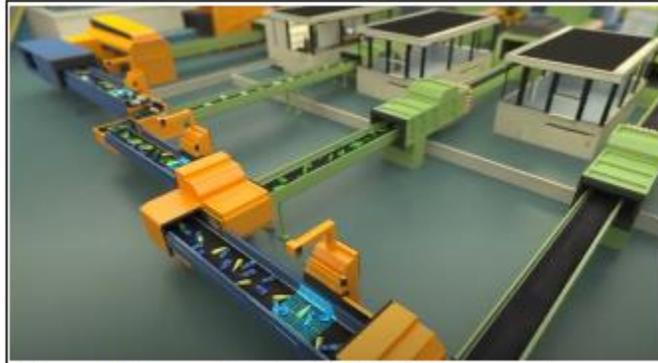


Figura 5.2 Separación automática de plásticos commodities para reproceso.

Ya sea manual o automatizada, la separación se efectuará de acuerdo a las necesidades del proceso que vaya a tomar el lote en cuestión de acuerdo al código SPI, por colores, o por el proceso de manufactura del cual proviene.

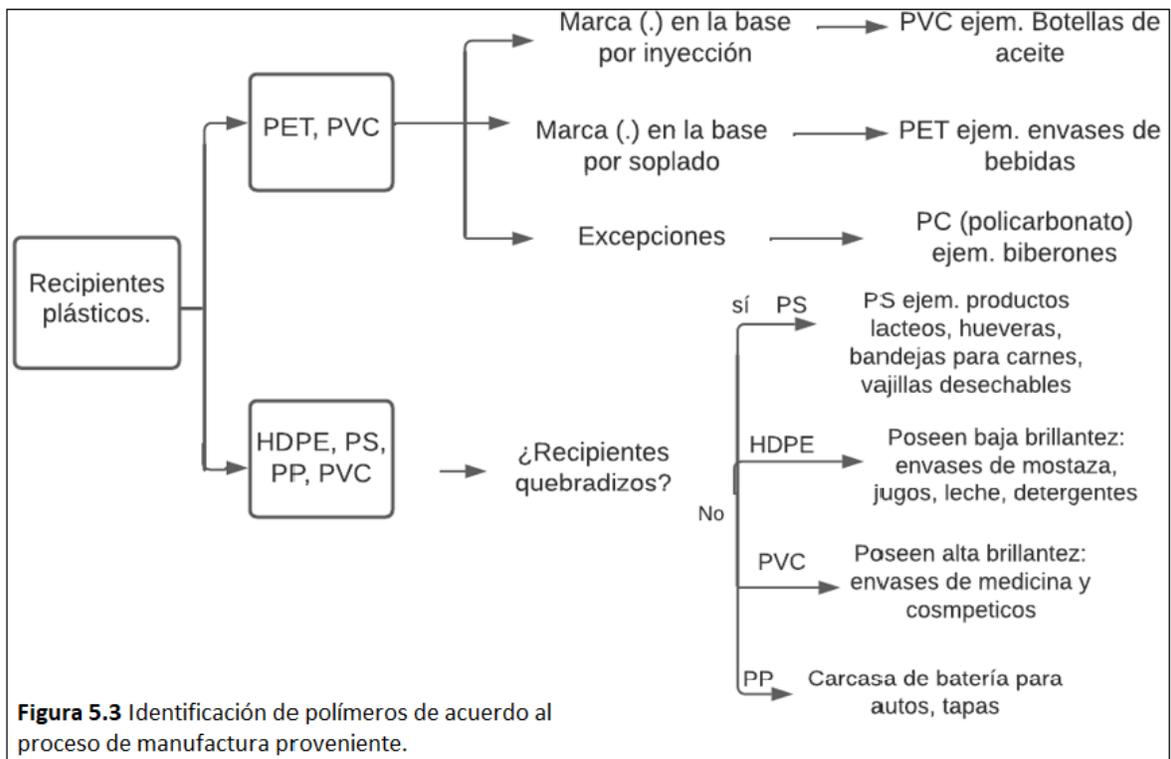


Figura 5.3 Identificación de polímeros de acuerdo al proceso de manufactura proveniente.

3.53 Molienda

Una vez separados los plásticos, se hacen pasar por un molino encargado de



Figura 5.4 Molino de plástico manual.

triturarlos a través de espas de tal forma que al adquirir un tamaño adecuado (1cm²), caen por gravedad obteniendo *hojuelas* o *scraps*. Al hacer uso del molino es indispensable contar con orejeras y goggles de seguridad ya que es un equipo que produce altos decibeles auditivos por lo que la exposición por tiempos prolongados puede resultar nocivo para la salud del operario además de que existe alta probabilidad de que alguna hojuela brote

fuera del molino.

Es en la molienda precisamente donde en ocasiones el plástico de reciclaje se realiza la combinación de material virgen o de mayor pureza, esto con el objetivo de aumentar el rendimiento y mejorar las propiedades mecánicas y físicas del material al reprocesar. En ocasiones durante el acopio de residuos plásticos se encuentran lotes provenientes de plantas fabricantes de botellas denominadas preforma, las cuales cuentan con propiedades de alta calidad que pueden ser mezcladas de igual manera o incluso ser reprocesadas sin pasos intermedios destinadas a la producción de piezas nuevas de calidad farmaceutica.

3.54 Lavado y secado

El lavado de *scraps* tiene como finalidad retirar impurezas y aceite no deseado que podría afectar la calidad del producto terminado al final del proceso. De acuerdo a los requerimientos de dicho producto, se toman decisiones industriales de lavado intenso, moderado o no lavado basándose en variables como el rubro industrial al cuál se destina la producción de determinado lote de producto nuevo.

Cabe mencionar que éste paso repercute en el precio de venta directa en la hojuela.

Secado

Existen principalmente dos formas de tratamiento para el secado de *scrap*:



Figura 5.5 Secador centrífugo para plástico.

La primera consiste en introducirlo en un secador centrífugo para posteriormente secarlo con aire caliente generado por un quemador de gas propano o queroseno para obtener una humedad aproximada del 0.5%

Una alternativa más consiste en secar el material exponiéndolo a la intemperie; sin embargo ésta técnica es poco utilizada debido a: cuestiones económicas, de tiempo (ya que al ser materiales de uso corriente que debido a su alta demanda resulta

prácticamente imposible conservarlos en planta hasta su secado total), y de afectación directa al material dada la radiación solar prolongada que produce la degradación de algunos materiales afectando la manejabilidad incluso al ser mezclados con material virgen.

3.55 Peletizado

Es el proceso mediante el cual se obtienen pequeñas partículas de polímero mediante un proceso inicial de *extrusión* [Figura 5.6].

Se fluidiza el *scrap* o aglomerado (se añaden aditivos de ser necesario) a través de un *extrusor* que en términos simples se puede describir como un cilindro que contiene un *husillo* responsable de dirigir la trayectoria del polímero a lo largo del cilindro, dentro del equipo extrusor es preciso mantener

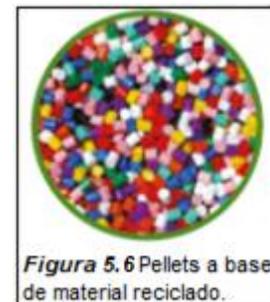


Figura 5.6 Pellets a base de material reciclado.

temperaturas específicas mediante resistencias eléctricas con la finalidad de obtener uniformidad en la *boquilla de extrusión*. [35]

La boquilla de extrusión se encarga de llevar el plástico hacia un filtro encargado de liberar al plástico libre de impurezas para su posterior paso por la boquilla de salida dando como resultado largas y delgadas tiras que serán enfriadas en su paso por recipientes con agua a temperatura ambiente. Posteriormente ya en estado sólido, dichas tiras son cortadas en fracciones de entre 8-10mm mejor conocidas como *pellets*. Posteriormente los pellets son secados hasta alcanzar una humedad de 0.5%.

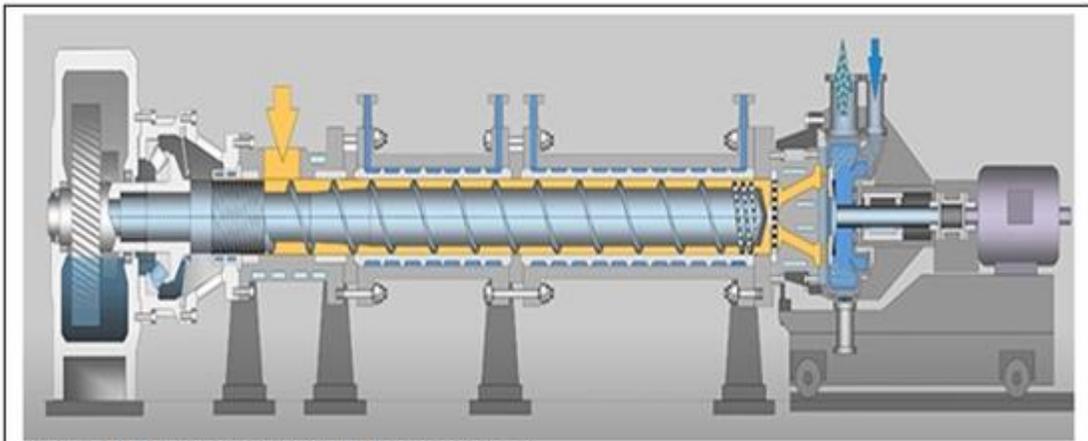


Figura 5.7 Estructura interna de un extrusor.

Existen diferentes tipos de extrusión, y dependerá del procesado final al que esté destinado determinado lote de pellet u hojuela la decisión del tipo de extrusor y boquilla a utilizar pues para la fabricación de pellets antes mencionada por lo general se utiliza una boquilla de paso directo mientras que para la producción de rollos donde se requiere embobinar películas plásticas, es preferible utilizar un dado plano.

3.6 Procesado final

Con base en la demanda comercial, el material reciclado puede ser reprocesado para obtener nuevos productos. Cabe mencionar que las propiedades mecánicas y termodinámicas de los materiales reciclados son menores a las originales del polímero virgen, para contrarrestar estas diferencias, el material reciclado puede ser coextruido con material virgen de acuerdo a las especificaciones comerciales requeridas. Adicionalmente, durante el proceso es posible añadir aditivos o colorantes con el objetivo de alcanzar el mismo propósito comercial.

Los termoplásticos son calentados a temperaturas cercanas a la temperatura de fusión del polímero en cuestión con la finalidad de llevarlo a estado líquido y entonces ser vaciado o inyectado en moldes que le darán forma final sólida.

3.61 Inyección

El modelo por inyección consiste en que el termoplástico en forma de pellet o aglomerado es extruido hasta una boquilla conectada a un molde donde será enfriado y obtendrá la forma predeterminada por éste para posteriormente ser retirado.

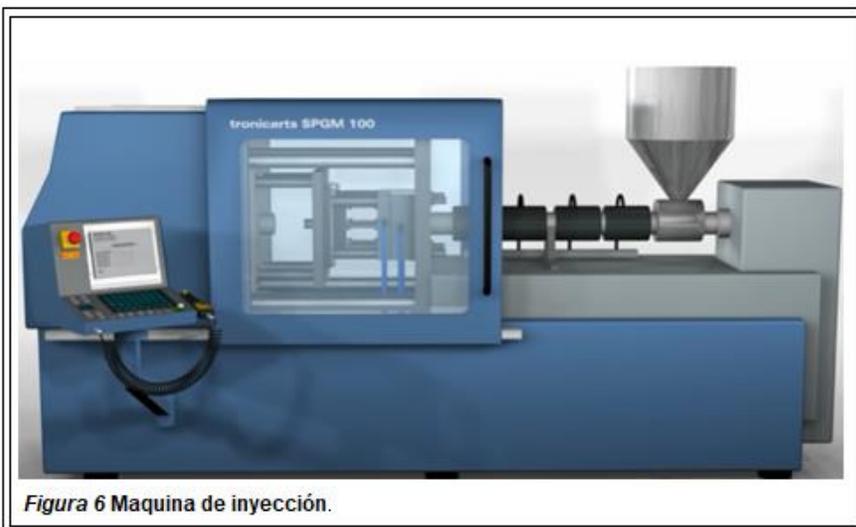


Figura 6 Maquina de inyección.

3.611 *El moldeo*

La forma de moldeo tiene vital importancia en la conformación y calidad últimas del producto terminado pues se debe cuidar la continuidad del proceso sin afectar la calidad de las piezas terminadas, para ello debe mantenerse la temperatura y la presión del material inyectado hasta que el plástico se enfríe a una temperatura adecuada para la apertura del molde. La velocidad de apertura debe cuidarse también con la finalidad de no alterar el proceso ni la calidad de las piezas y poder extraer el producto de manera segura. En condiciones ideales de funcionamiento de la maquina inyectora bastará con conocer el manual de usuario y programarla de acuerdo al material utilizado, no obstante, al tratarse de material reciclado siempre se encontrarán ligeras variaciones en cuánto a temperatura requerida para obtención del producto ocasionando que el proceso resulte ligeramente intuitivo.

Una vez terminado este proceso el husillo retrocede para recoger material nuevo de la tolva y repetir el proceso en serie tantas veces como sea indicado en el número de pedido y folio de producción requerido.

A) Unidad de Inyección.

Es la parte plastificante del proceso, la cual se encarga de fundir el polímero en una masa homogénea y uniforme. Consta principalmente de tobera, tornillo de empuje, válvula de retención, bandas de calefactoras y cilindros hidráulicos.

Durante la fase de plastificación el extremo de salida y el tornillo acumulan una reserva o carga de material fundido al frente, el tornillo se mueve hacia atrás contra del frente de presión mientras gira, con lo cual empuja el material hacia la parte frontal y a su vez ayuda a fundirlo con el rozamiento que genera. Cuando se completa la etapa de plastificación, se abre la válvula de retención de flujo, el tornillo detiene su giro y se le aplica presión que lo convierte en un embolo o pistón que impulsa el material fundido acumulado, a través de la boquilla hacia el molde, que se encuentra montado en la placa porta moldes.

B) Unidad de cierre.

Es la encargada de sostener el molde y genera la fuerza de cierre mientras se inyecta el polímero, además permite la expulsión de la pieza. El cierre del molde se realiza por medio de una prensa controlada por sistemas hidráulicos o mecánicos. La fuerza de cierre requerida depende de la máxima área proyectada de la pieza a inyectar, y la presión del modelo. Esta fuerza contrarresta la resistencia que genera el material fundido cuando se inyecta.

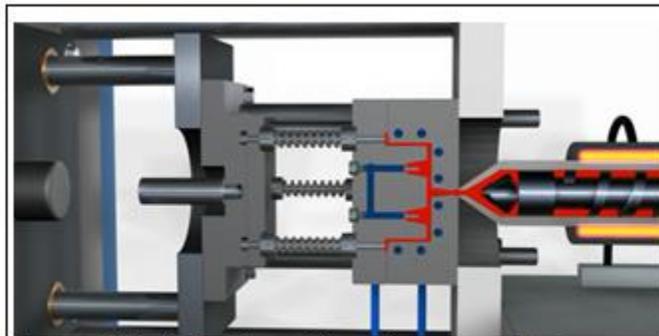


Figura 6.1 Unidad de inyección y cierre de molde de una maquina inyectora.

En el moldeo por inyección se requiere conocer la capacidad tanto de la maquina inyectora como del molde pues es preciso inyectar la cantidad adecuada de termoplástico fluidizado.

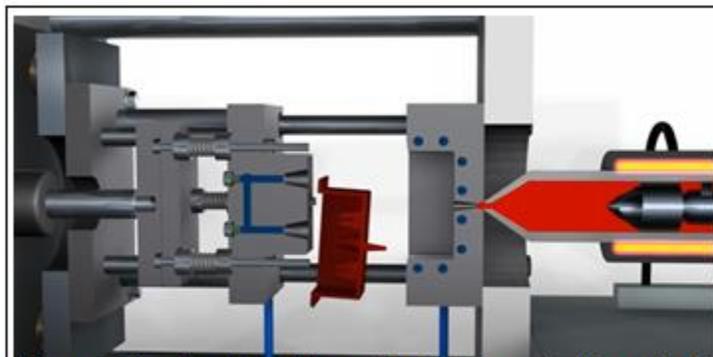


Figura 6.2 Apertura de molde y obtención de producto terminado a partir de moldeo por inyección.

3.62 Soplado

Este método es utilizado para producir tanques de combustible automotriz, botellas, y recipientes huecos en general. Se utiliza como base un tubo conocido como “preforma” obtenido como resultado de un proceso de inyección previo, la preforma es colocada dentro de dos moldes calientes emparejados haciendo pasar una corriente de aire comprimido que la infla obteniendo finalmente la forma predeterminada por los moldes.

El moldeo por soplado encuentra su mayor demanda dentro de la industria médica, farmacéutica, y automotriz donde se requiere un mayor detalle en las características físicas y estéticas del producto terminado.

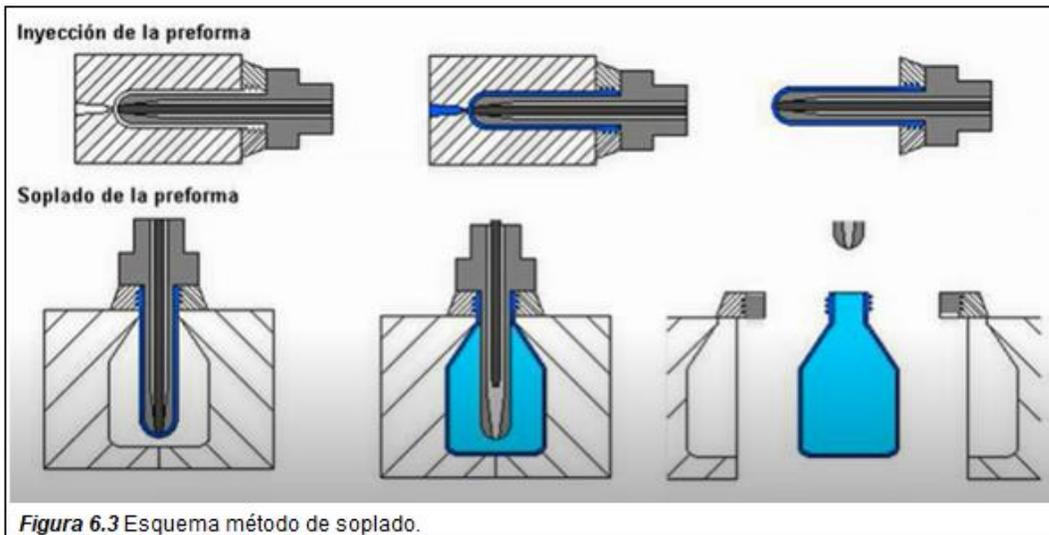


Figura 6.3 Esquema método de soplado.

Los plásticos más comúnmente procesados mediante éste método son: polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP), poliamidas (PA), tereftalato de polietileno (PET). Existen algunas *variables* a considerar dependiendo al material a procesar, tales como la temperatura ya que dependen de las características del material las velocidades de cierre, apertura y expulsión del molde, presión y descompresión, distancia de la inyección, tiempo de inyección y enfriamiento de la pieza.

3.63 Hilado



Figura 6.4 Rafia obtenida mediante proceso de hilado polimérico.

El termoplástico es empujado a través de una boquilla con múltiples perforaciones pequeñas (especificado por el cliente), y es dirigido hacia una máquina conocida como *hilador*. El hilador se encarga de girar produciendo un carrete de hilo. Dentro de los termoplásticos procesados mediante éste método encontramos el polipropileno (PP), las poliamidas (PA), y el tereftalato

de polietileno (PET). La *Figura 6.5* esquematiza el proceso de hilado de un polímero, en este proceso se deben mantener constantes el flujo de aire de enfriado y la velocidad de los rodillos de bobinado para no alterar la continuidad del proceso o reducir la calidad del producto.

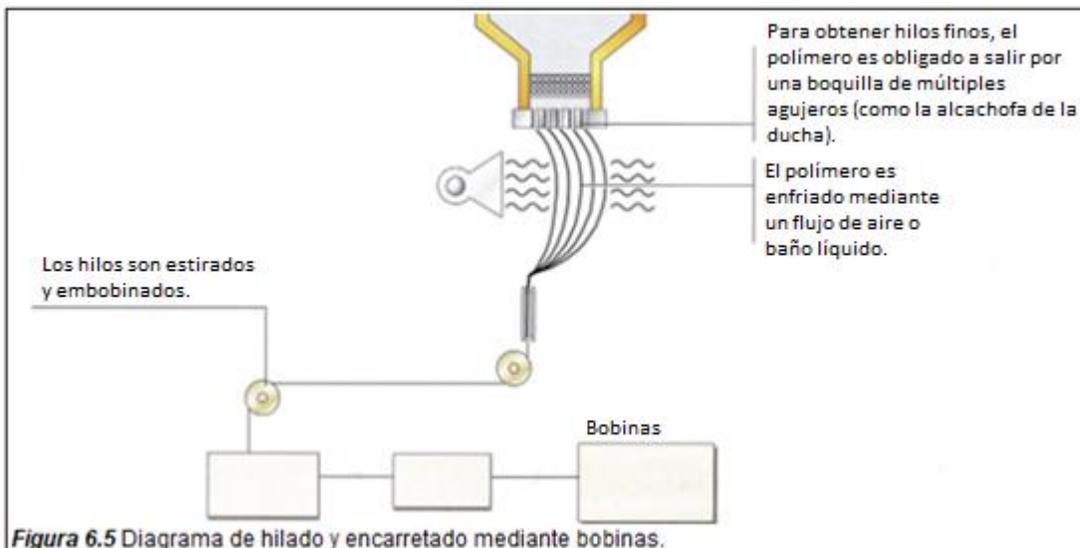


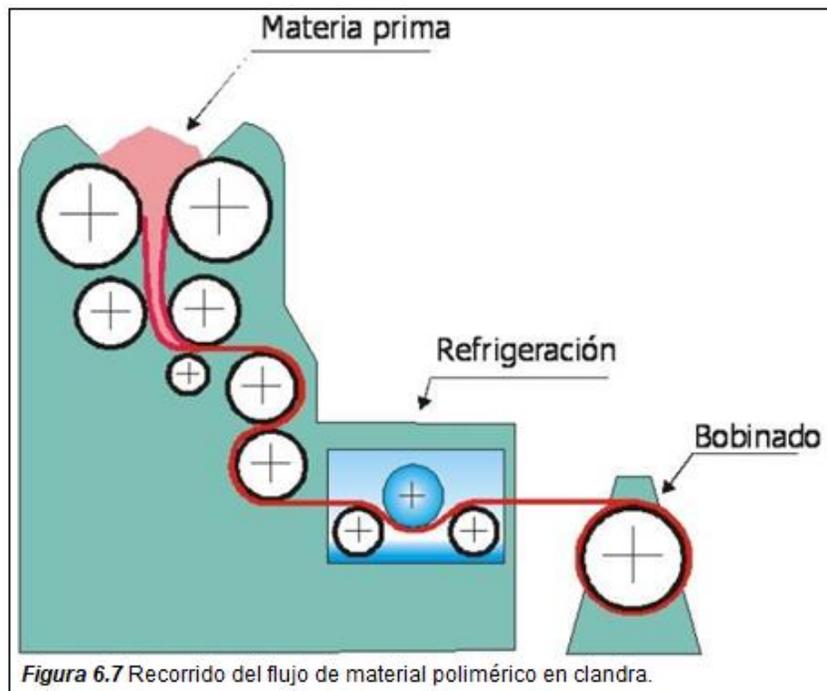
Figura 6.5 Diagrama de hilado y encarretado mediante bobinas.

3.64 Calandrado



Al final del equipo extrusor se coloca *un dado plano o boquilla plana* que produce una película de plástico que se hace pasar por un juego de rodillos, mismos que le darán las características de grosor “cédula”, anchura, y modelo finales. Mediante el calandrado se obtienen principalmente rollos, sin embargo cuándo la cedula de la película es grande o si

es requerido por el cliente, es posible comercializarlo en forma de láminas. El operario responsable de embobinado debe contar con la capacitación adecuada en cuanto al uso del equipo ya que existen calandras que recortan automáticamente el producto previamente programado para tener determinada longitud, sin embargo en el 80% de los equipos no se cuenta con tal tecnología por lo que es importante mantener un hábito de la medición frecuente, así como verificar que la cedula del material concuerde con la requerida por el cliente.



3.65 Termoformado



Figura 6.8 Producto terminado mediante proceso de soplado.

El proceso de termoformado consiste en utilizar hojas de polímero termoplástico (generalmente producto de un proceso de calandrado), dichas hojas de termoplástico son sometidas a moldes que ejercen parámetros de vacío y presión tales que conforman el plástico de acuerdo al modelo preestablecido por el molde. El proceso es similar a una imprenta donde cada hoja puesta bajo el molde adquiere la forma programada, existen máquinas de termoformado automáticas y semiautomáticas donde el operario debe contar con la destreza adecuada para introducir y retirar las láminas termoformadas sin detener la producción. El uso de una u otra influye directamente en la velocidad de producción. En la *Figura 6.8* se muestran algunos ejemplos de los productos terminados mediante un proceso de termoformado.

3.66 Espumas

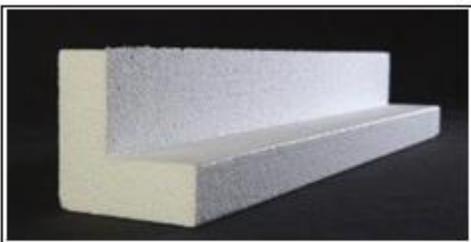


Figura 6.9 Poliestireno expandido.

El polímero es alimentado añadiendo un agente espumante que al ser calentado se descompondrá generando nitrógeno, CO₂, o algún otro gas.[36] Durante éste proceso, los pellets aumentan de diámetro quedando huecos, se inyectan dentro de un dado para fundirlos dando origen a materiales excepcionalmente ligeros en densidad.[37] Dentro de las principales aplicaciones de los polímeros tratados mediante el proceso de espumación se encuentra el material de tapicería, calzado, y embalajes de protección para equipo electrónico. Las propiedades más relevantes que podemos encontrar entre los materiales obtenidos mediante un proceso de espumación son:

- Baja densidad
- Alta resistencia al impacto
- Buenos aislantes térmicos



3.67 Recubrimientos



Figura 6.11 Recubrimiento aislante para cables.

El material polimérico es extruido y adherido principalmente a materiales metálicos con la finalidad de añadir propiedades aislantes térmicas y eléctricas a estos.

- Aislantes

Se coloca un recubrimiento aislante sobre el conductor para evitar fugas de corriente y prevenir accidentes del tipo “choque eléctrico. Las condiciones ambientales y climáticas o los contactos con agentes agresivos, así como la falta de cuidado en la instalación, manejo y conservación, son las causas principales que limitan la vida de un cable. [38]

Los aislamientos termoplásticos más usuales en la fabricación de cables eléctricos son: PVC (Policloruro de vinilo), Z1 (Poliolefinas), PE (Polietileno lineal), Poliuretano (PU), y Teftel, Teflón (fluorados).

El PVC y el Polietileno se utilizan como aislamiento y como cubierta protectora de los cables eléctricos, por su alta Resistencia a los impactos y a la abrasión.

- **Semiconductores**

Los semiconductores se forman a través de capas extruidas de resistencia eléctrica reducida de materiales afines a los aislamientos. Si éstos son termoestables, las capas semiconductoras también lo serán.

Son aplicables fundamentalmente a los cables de Media y Alta Tensión en dos capas: la primera, directamente sobre el conductor. La segunda, entre el aislamiento y pantalla.

El proceso de producción de las capas semiconductoras y del aislamiento se realiza comúnmente por el proceso de “triple extrusión” que es la más avanzada tecnología en la actualidad. La extrusión se realiza a través de un cabezal de triple capa. Esto pone en contacto directo las semiconductoras y el aislamiento, y garantiza la ausencia de elementos extraños. De esta forma, se evitan defectos en el semiconductor interno, que podrían generar descargas parciales y reducción de la vida útil del cable [39].

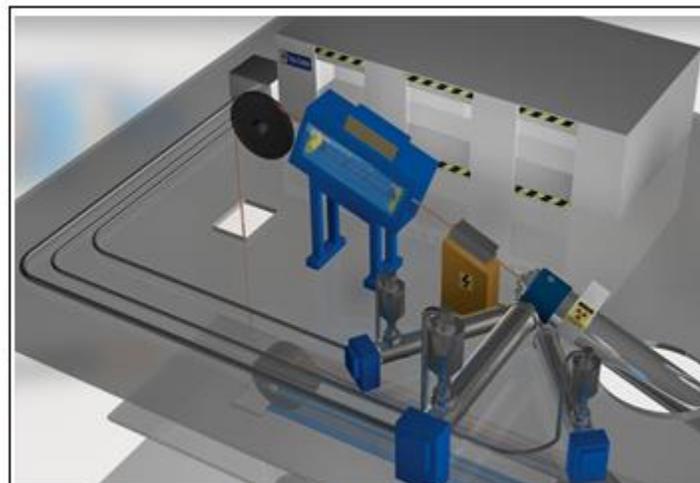


Figura 6.12 Extrusión de recubrimientos aislantes y semiconductores sobre cable para corriente eléctrica.

3.7 Procesamiento de plásticos commodities de acuerdo a sus consideraciones de operación.

A continuación se muestra diagrama de flujo para reproceso general de plásticos commodities de reciclaje.

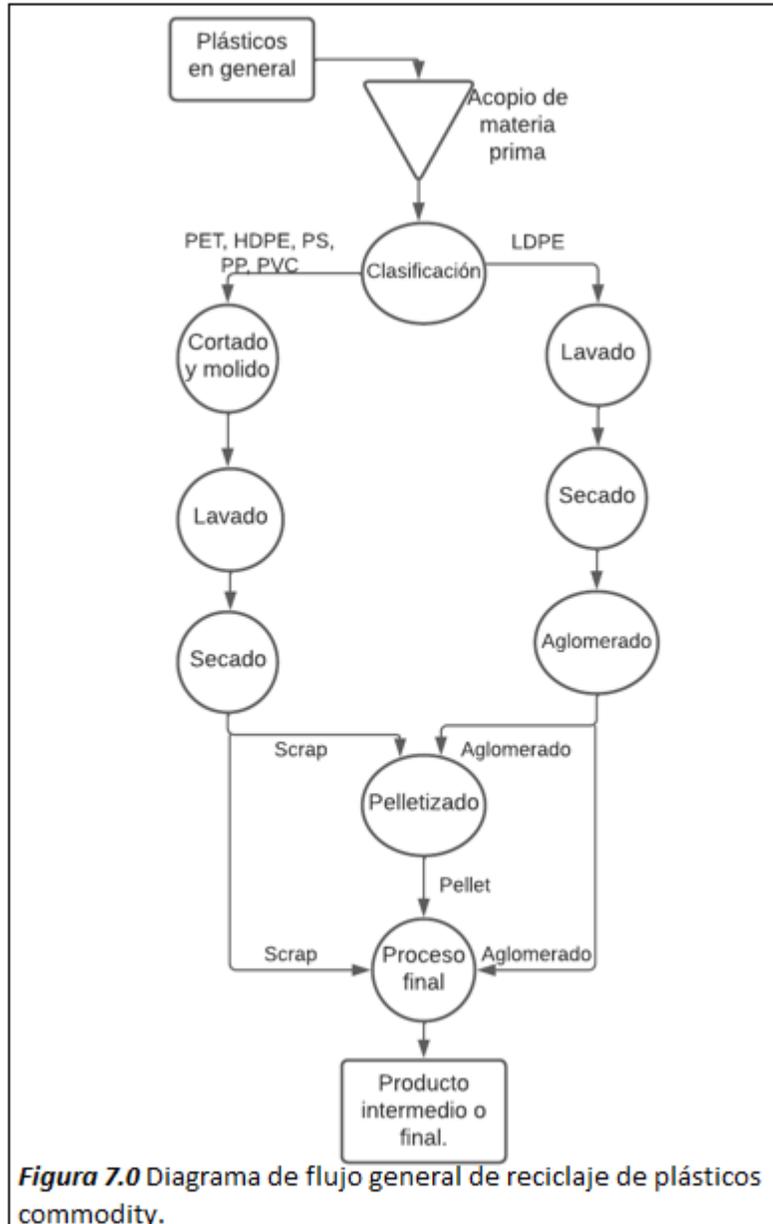


Figura 7.0 Diagrama de flujo general de reciclaje de plásticos commodity.

Independientemente del procesado al que se sometan los diferentes tipos de plástico commodity, cabe mencionar que la eficiencia de dicho reproceso alcanza rendimientos elevados mayores al 95% debido a que incluso durante la producción de piezas nuevas, las partes plásticas sobrantes se van acumulando para tener así al final de la producción cierta cantidad de material que puede ser reintroducida a la molienda y posteriormente ser extruida o coextruida y formar parte de la misma línea de producción.

Con la finalidad de comprender a mayor detalle el reciclaje de plásticos el reciclaje de cada material *commodity*, a continuación se presentan algunas consideraciones y medios de operación general para su reciclaje y obtención de nuevo producto terminado.

3.71 Reciclaje de PET

Después de evaluar las condiciones del material recibido de acopio, se decide si es preciso lavarlo o no de acuerdo a un primer examen de calidad, una vez aceptado, es molido para que una vez obtenida la hojuela sea posible cargarla a la tolva de secado de un extrusor. El extrusor debe estar adecuado previamente a las condiciones de temperatura aproximada de trabajo del tereftalato de polietileno en sus diferentes zonas.

Zona de alimentación: conocida como "garganta de alimentación", debe mantenerse al menos a 50°C por debajo de la temperatura de fusión del polímero. Una temperatura muy baja en la zona de alimentación impide que la fusión de la resina produzca la adhesión de la misma a la superficie del tornillo; minimizando el flujo de material por arrastre, y por lo tanto el caudal extruido.

Zona de compresión: Área donde los *álabes* del husillo decrecen gradualmente cumpliendo la función de fundir y homogeneizar el fluido.

Zona de dosificación: Esta zona ejerce presión sobre el material para dosificarlo hacia el *cabezal* y garantiza que el material salga homogéneo a la misma temperatura y presión.

De acuerdo a las condiciones del material se da un tiempo de secado que permita el flujo de éste sin que presente porosidades o impurezas atípicas en un primer ensayo, una vez logrado esto, se procede a calibrar el equipo de acuerdo a las especificaciones del producto a obtener siguiendo el manual de usuario. Si se trata de inyección por ejemplo, es necesario calibrar la unidad de moldeo en temperatura, tiempo cerradura, y tiempo de apertura, así como fijar tiempos de enfriado que permitan la continuidad del proceso.

3.72 Reciclaje de HDPE

Para la extrusión de HDPE es necesario evitar que el material gire junto con el husillo por lo que se requiere un cilindro con zona acanalada en la parte de alimentación ya que éstas favorecen el procesamiento de resinas de bajo coeficiente de fricción ya que la fuerza de arrastre o fricción del material conserva una relación inversamente proporcional al avance dentro del equipo por lo tanto el caudal debe ser mayor cuanto mayor sea el coeficiente de fricción del sólido con la carcasa con respecto al del sólido con el eje del tornillo. Por ello las carcasas de las extrusoras en la sección de alimentación suelen “ranurarse” según las generatrices del cilindro.

3.73 Reciclaje de LDPE

Las zonas de alimentación acanaladas permiten tener bajo control el coeficiente de fricción polímero-cilindro mediante la geometría reduciendo la sensibilidad con respecto a las propiedades termodinámicas del material por lo que existen diversos diseños de zonas de alimentación acanaladas. Además, permiten aumentar el volumen en la sección de alimentación acelerando el volumen de producción.

Para el caso hipotético de una línea de producción de LDPE en máquinas con sección de alimentación lisa con un diámetro de 120mm se obtendría un flujo al final de 470kg/h mientras que una zona de alimentación acanalada (cuadrada) producirá 650kg/h.

3.74 Reciclaje de PVC

Para el reciclaje de PVC (molido) se requiere añadir al material un solvente selectivo para después ser filtrado y evaporado donde se recupera el solvente quedando así separado el PVC al que se le somete a proceso de secado.

En la etapa de disolución, el PVC junto con el solvente son expuestos a un aumento de temperatura y agitación obteniendo de esta manera la disolución del PVC.

En la etapa de evaporación se pulveriza la disolución a través de un extractor de vapor que genera pequeñas gotas y calor para la completa evaporación del solvente para que posteriormente el PVC sea separado y expuesto a su secado mediante aire caliente y vibración para eliminar el exceso de humedad.

Al alimentar la máquina extrusora con PVC, una vez más se requiere que el material no gire dentro del husillo o al menos gire a una velocidad menor por lo que será requerido un cilindro con zona acanalada de nuevo para impulsar el avance a lo largo de la camisa (es preciso recordar que a mayor fricción menor rotación del material junto con el tornillo, y por lo tanto, mayor movimiento hacia adelante).

3.75 Reciclaje de PP

La separación de polipropileno es probablemente el paso más difícil en su reciclaje puesto que suele ser confundido con otros plásticos a la hora de su recolección y como resultado se obtienen *mermas* de hasta 10% tan solo en su acopio. Por ello se debe poner atención especial en cuanto a términos de optimización del procedimiento para su reciclaje. Una medida que se suele tomar cotidianamente en la industria es que a la hora de alimentar el material al extrusor, se utilice un tornillo Crammer o alimentador forzado que garantice la repartición de forma homogénea en la alimentación del extrusor. Posteriormente se obtiene el mismo material en forma de pellet para su proceso de inyección para obtener producto terminado, principalmente envase de polipropileno clarificado.

3.76 Reciclaje de PS

El poliestireno es esencial en la tecnología, medicina, y alimentación por su capacidad en la conservación y seguridad, durabilidad y poco peso. Los envases residuales de productos principalmente lácteos como yogurt al tener un bajo peso han permitido a la industria ahorrar grandes cantidades económicas en su transporte. En el proceso de reciclaje, más específicamente, en el proceso de separación de estos envases, se generan mermas de etiqueta y otros residuos que deben ser apartados para poder procesar y garantizar una pureza en nuevos productos. Por ello es sometido a dos pasos de separación donde en el primero se eliminan las impurezas de tamaño visible mientras que en el segundo que es posterior a su trituración, se separa por densidad cualquier residuo de etiqueta, restos orgánicos, pegamento, o restos de otros plásticos que pudiese contener ya que el poliestireno es más denso que el agua.

Posteriormente se elimina la humedad mediante un proceso de secado para que de éste modo pueda pasar al proceso de extrusión donde como resultado se obtienen pellets.

En los laboratorios industriales de reciclado se realizan exhaustivos controles que garantizan que el producto en forma de pellet puede usarse directamente en la fabricación de nuevos artículos cumpliendo con los requisitos legales y del cliente enviándose siempre con su ficha técnica y de seguridad para de esta manera poder ser moldeado.

Debido a la demanda global, la forma principalmente utilizada de poliestileno radica en su forma expandida EPS. El poliestireno expandido es liviano ya que el 98% de su composición es aire, y el 2% restante PS. El poliestireno expandido es obtenido sometiéndolo a una cámara de vapor (200°C) que se encarga de darles dicha propiedad.

CAPÍTULO 4

ENFOQUE DE CALIDAD Y NORMATIVIDAD PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PLÁSTICOS.

“La calidad es hacerlo bien cuando nadie está mirando.”

Henry Ford.

4.1 Gestión de calidad

Tomando en cuenta lo descrito hasta el momento cabe mencionar que la demanda en las características específicas de las piezas requeridas en el mercado precisa que la industria se mantenga en busca de innovación y mejora continua en sus procesos para así ofrecer satisfacción total a las partes interesadas beneficiadas comercialmente mediante el procesamiento de plásticos commodities.

No debemos olvidar que se tienen tres determinantes esenciales en la rentabilidad de la producción de productos que son productividad (medida de la eficiencia definida como la cantidad de producción lograda por unidad de insumos), el costo, y la calidad. Y que de estos tres es precisamente la calidad el parámetro decisivo en cuánto al éxito o fracaso de una organización. [40]



El sistema de Gestión de la calidad está basado en los requisitos de la norma ISO 9001:2015, NMX-CC-9001-IMNC-2015 y lo descrito en este procedimiento, es aplicable para todos los proyectos de implementación y mantenimiento, proporcionados a los clientes.

La organización internacional para la estandarización ISO (por sus siglas en inglés) ha proporcionado normas generales estrictas en cuanto a seguridad y calidad de diferentes procesos de producción en serie de diversas industrias; y la industria de los polímeros no es la excepción, en la industria del plástico se han determinado variables externas e internas que son pertinentes para su propósito, planeación y que pueden afectar los resultados previstos del SGC. Estas variables principalmente son de tipo:

- Legal
- Social
- Cultural
- Económico
- Tecnológico
- Competitivo

Y para su mejora, y seguimiento se han desarrollado procesos de documentación que fijan un panorama directo de acción, tales como:

- Contratos.
- Documentación de fórmulas.
- Resultado de muestreos.
- Diagrama de flujo general de procesos.
- Estadística de contratiempos.
- Estadística de siniestros.
- Estadística de fallas en mantenimiento.
- Estadística de calidad de materia prima.

A continuación se muestra un diagrama típico de operación para la mejora continua en la gestión de calidad (Figura 8.1).



Figura 8.1 Diagrama de mejora continua en el SGC industrial basado en ISO 9001:2015.

Existen diagramas de verificación y apoyo de los sistemas de gestión de calidad en las empresas destinados a dar evaluación y retroalimentación o refuerzo a las partes internas involucradas en la producción de plásticos commodities destinadas a cumplir con los estándares de calidad demandados por el mercado. En esta evaluación se involucra tanto la parte operativa como técnica, así como la comercial pues cada una de estas divisiones tiene un papel fundamental y responsabilidad directa e indirecta en la calidad del producto terminado viéndose reflejado directamente en la imagen externa y renombre de la empresa. [41]

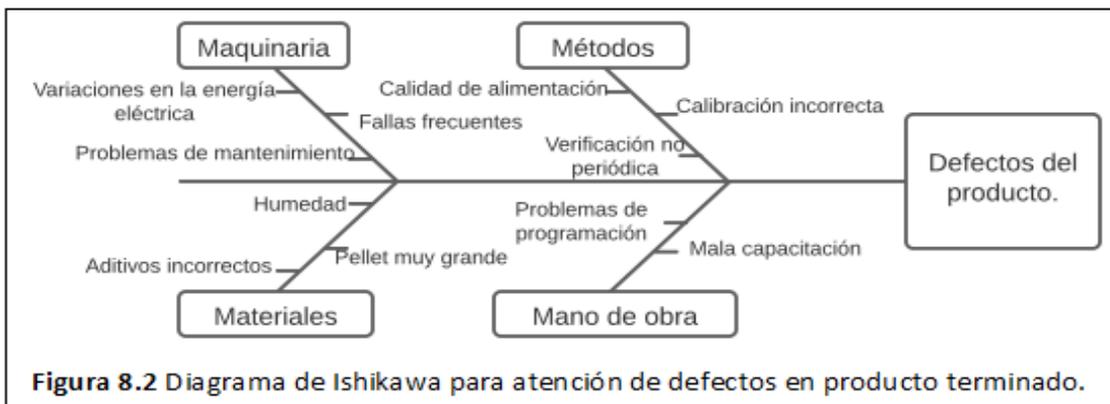


Figura 8.2 Diagrama de Ishikawa para atención de defectos en producto terminado.

Es debido a la responsabilidad individual de cada subdivisión de las empresas y el rol que cubren que es necesario tener una cuantificación y documentación que describa detalladamente las características de su participación y su aportación a determinado lote requerido.

4.11 Enfoque al cliente.

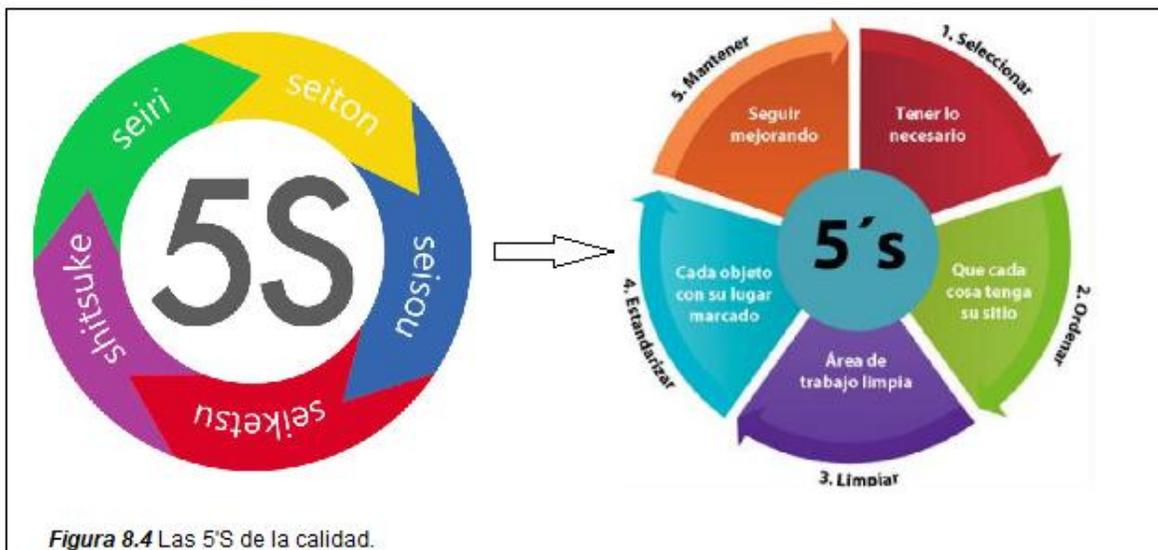
La alta dirección debe mantener un enfoque de satisfacción al cliente y asegurarse de determinar, comprender y cumplir sus requisitos, de calidad, legales y reglamentarios aplicables, que a su vez deben determinar y considerar los riesgos y oportunidades que puedan afectar la capacidad para aumentar su satisfacción, convirtiendo dichos requisitos en formas y compromisos de trabajo.



Figura 8.3 Enfoque hacia satisfacción del cliente.

4.12 Acciones preventivas y correctivas

Toda vez que se inicia alguna operación es necesario iniciar la búsqueda de áreas de oportunidad para la mejora del proceso, sin embargo se ha encontrado que también es pertinente tomar acciones dirigidas a la prevención de siniestros y fallas técnicas en el proceso mediante el seguimiento de mantenimiento a las partes mecánicas del proceso, estadística de fallas comunes, y seguimiento de modelos de seguridad industrial. [42]



En la industria es preciso llevar estadística de no conformidades para poder así llevar a cabo la aplicación de acciones correctivas para eliminar las causas de una no conformidad existente y prevenir la recurrencia, dicha estadística comúnmente incluye:

- Índice de quejas.
- Estadística de productos o procesos no conformes.
- Materia prima adquirida con defectos.

- Índice de devolución de clientes.
- Documentación de procesos variables.
- Resultados de auditorías internas y externas.
- Incumplimientos en el desempeño de los procesos.
- Incumplimientos de los objetivos de la calidad y de los procesos.
- Resultados obtenidos mediante el seguimiento y medición a los procesos productivos y seguimiento y medición al producto.

La atención de solicitudes de no conformidad forma parte esencial de la evolución industrial pues con ello además de aumentar la demanda comercial, se impulsa la mejora continua en los procesos dando como resultado el aumento en la eficiencia de los procesos y a su vez generando menores cantidades de scrap o residuos.

- a) Se identifica la no conformidad y se documenta para que el personal responsable de gestión de calidad solicite la acción correctiva que solucione de manera inmediata el problema.
- b) Se identifica la causa raíz y se documentan acciones preventivas para irregulares similares que pudieren emerger producto de la misma causa raíz. Se proponen soluciones y establece el plan de acciones a Implementar.
- c) Se registran las acciones propuestas de acuerdo al análisis efectuado dando como resultado un documento de acción que pasa a manos de alta dirección para su aprobación. En caso de ser aprobado, la dirección se encarga de proporcionar los recursos necesarios para su implementación.

Una vez obtenidos la autorización y los recursos requeridos, el personal responsable se encarga de implementar las acciones propuestas y se le asigna un número de control para su seguimiento e identificación futura.

La dirección verifica y analiza el impacto de los resultados de la acción correctiva mediante su seguimiento y evaluación en el corto y mediano plazo.

- d) Para todo caso en el que sea pertinente realizar modificaciones o implementación de nuevos procedimientos, se realiza un análisis de riesgos y nuevas áreas de oportunidad para las partes involucradas, también es preciso mantener una cultura de comunicación efectiva que mantenga enterada a toda la organización en materia de conocimiento, y modo de influencia dentro de las áreas de trabajo.

Cada modificación en los procesos debe quedar documentada y evidenciar a groso modo los siguientes puntos:

- ✓ Identificación de la no conformidad y su naturaleza.
- ✓ Acción de corrección.
- ✓ Análisis de la no conformidad.
- ✓ Plan de acciones a implementar.
- ✓ Seguimiento.
- ✓ Evaluación y resultados.

Posterior a ello el personal responsable de gestión de la calidad cierra, archiva y controla las acciones realizadas mediante su número de folio.

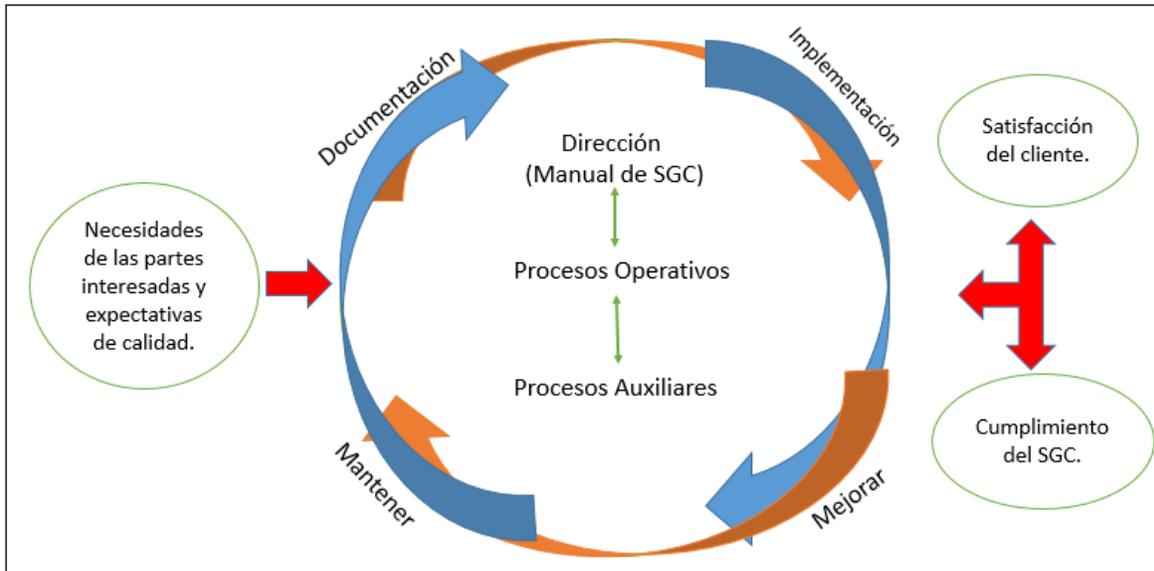
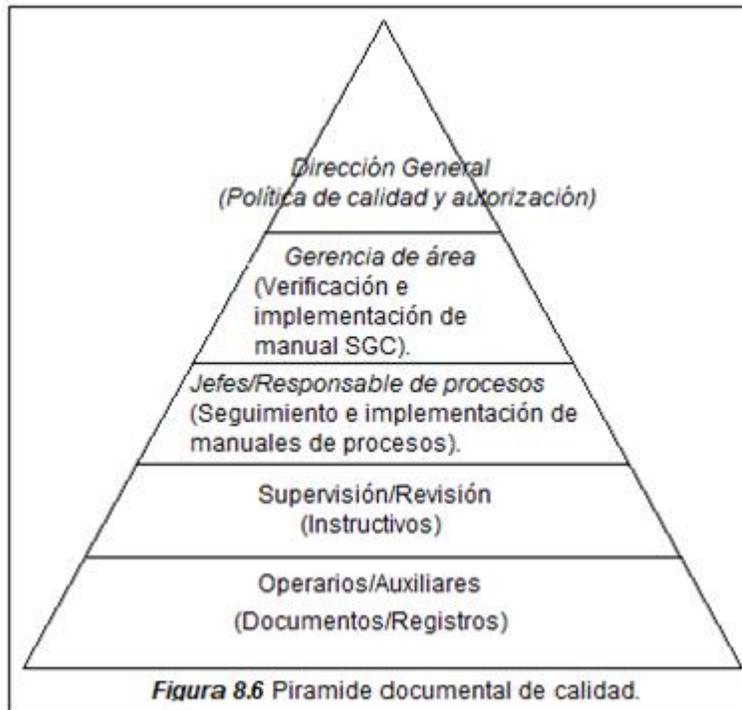


Figura 8.5 Diagrama general de sistemas de gestión de calidad.

4.13 ESTABLECIMIENTO DE LA POLITICA DE CALIDAD Y MEJORA CONTINUA.

En la industria es muy frecuente escuchar la frase “la calidad la hacemos todos”, y es que en realidad en cualquier organización exitosa se tiene como común denominador el hecho de que cada una de sus partes suma sus esfuerzos para conseguir el máximo potencial de la organización pues de ella se benefician todos. En ocasiones cuándo se trata de material polimérico de reciclaje resulta complejo conservar los estándares de calidad del producto terminado de reproceso dada la naturaleza de su procedencia; sin embargo, existen protocolos que hacen que la industria plástica consiga cumplir con la demanda de cantidad y calidad del mercado tal es el caso de la implementación de modelos como el modelo 5’S (*Figura 8.4*).

Asimismo es de gran importancia estructurar y conservar un organigrama y delegación de responsabilidades estrictamente delimitadas que impulse la innovación, y sea de utilidad para la localización específica de irregularidades.



4.14 Importancia de las auditorías internas y externas.

Existen protocolos generales de calidad sugeridos por diferentes autores, no obstante cabe mencionar que en la industria cada empresa tiene su una forma propia de gestión de calidad, y para ello se realizan auditorías internas de evaluación, objetivos, y establecimiento de mejoras en materia de proceso, seguridad e higiene, así como la realización de documentación para la toma de acciones correctivas y preventivas.

Los resultados de las auditorías internas quedan documentados para dar seguimiento a tareas pendientes y planteamiento de objetivos de mejora, una auditoría interna además de impulsar el desarrollo de la empresa, tiene como objetivo la previsión de posibles auditorías externas dadas por instituciones o autoridades generales en materia legal, y de protección para el consumidor.

4.2 Situación legal del reciclaje en México

Como se menciona al inicio del presente trabajo de actualización monográfica, el manejo de residuos plásticos en México es relativamente nuevo por lo que aún no se han fijado normas en cuanto a procesos de reciclaje en el Diario Oficial de México en concordancia con normas internacionales, sin embargo se pueden encontrar declaratorias sobre su existencia tales como:

CLAVE O CÓDIGO	TÍTULO DE LA NORMA
NMX-E-148-CNCP-2014	INDUSTRIA DEL PLÁSTICO-MALLAS SOMBRA DE COLOR NEGRO PARA LA AGRICULTURA-ESPECIFICACIONES (CANCELA A LA NMX-E-148-CNCP-2006).
Objetivo y campo de aplicación	
Esta Norma Mexicana establece las especificaciones que deben cumplir las mallas sombra de polietileno alta densidad o de polipropileno para usarse en la agricultura, invernadero, casa sombra y micro túneles, así como las especificaciones mínimas que deben cumplir los monofilamentos que lo conforman. Esta Norma es de aplicación a todo el territorio nacional.	
Concordancia con normas internacionales	
Esta Norma Mexicana no coincide con ninguna Norma Internacional por no existir Norma Internacional sobre el tema tratado.	
Bibliografía	
ISO-1806:2002 Fishing nets-Determination of mesh breaking force of netting.	
NMX-E-145/3-CNCP-2014	INDUSTRIA DEL PLÁSTICO-CONEXIONES HIDRÁULICAS DE POLI(CLORURO DE VINILO) (PVC) SIN PLASTIFICANTE CÉDULA 40 CON UNIÓN PARA CEMENTAR-SERIE INGLESA-ESPECIFICACIONES (CANCELA A LA NMX-E-145/3-SCFI-2001).
Objetivo y campo de aplicación	
Esta Norma Mexicana establece las especificaciones de las conexiones hidráulicas de poli(cloruro de vinilo) (PVC) sin plastificante cédula 40 con unión para cementar, utilizadas en sistemas de abastecimiento de agua potable que operan a presión y no expuestos a los rayos solares.	

Concordancia con normas internacionales

Esta Norma Mexicana coincide básicamente con la norma internacional ISO 1452-3:2009 Plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure-Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U)-Part 3: Fittings y difiere en lo siguiente:

- a) En esta norma mexicana se modifican las dimensiones debido a que se maneja el sistema inglés y la norma internacional maneja sistema métrico.
- b) El inciso c) de la figura 26 del punto 9 de la norma internacional, no se incluyó en la norma mexicana, por ser un proceso de inyección que no se utiliza en el país.
- c) Difiere en el punto 8 de la norma internacional, debido a que la Norma Mexicana sólo es para conexiones cédula 40.
- d) Se remplazan las referencias a las Normas Internacionales por las Normas Mexicanas correspondientes, lo anterior con objeto de cumplir con la normativa nacional de acuerdo con lo que se indica en el artículo 42 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Bibliografía

- NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 27 de noviembre de 2002.
- ASTM D 2464-06 Standard Specification for Threaded Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe Fittings, Schedule 80.
- ASTM D 2466-06 Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe Fittings, Schedule 40.
- ISO 1452-3:2009 Plastics piping systems for water supply and for buried and aboveground drainage and sewerage under pressure-Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U)-Part 3: Fittings.

NMX-E-232-CNCP-2014	INDUSTRIA DEL PLÁSTICO-SÍMBOLOS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS (CANCELA A LA NMX-E-232-CNCP-2011).
Objetivo y campo de aplicación <p>Esta Norma Mexicana establece y describe los símbolos de identificación que deben tener los productos fabricados de plástico en cuanto al tipo de material que se utiliza, con la finalidad de facilitar su selección, separación, acopio, recolección, reciclado y/o reaprovechamiento.</p> <p>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 que identifique al material de manera legible, así como aquellos productos que sean reprocesados por el fabricante (reciclaje post-industrial).</p>	
Concordancia con normas internacionales <p>Esta Norma Mexicana no coincide con ninguna norma internacional por no existir norma internacional sobre el tema tratado.</p>	
Bibliografía <ul style="list-style-type: none">• NMX-E-060-CNCP-2010, Industria del plástico-Terminología de los plásticos (Cancela a la NMX-E-060-1978). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 4 de mayo de 2010.• ASTM D7611/D7611M-13 Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification	

CLAVE O CÓDIGO	TÍTULO DE LA NORMA MEXICANA
NMX-E-263-CNCP-2016	INDUSTRIA DEL PLÁSTICO-POLIETILENO TEREFALATO RECICLADO UTILIZADO PARA ENVASES DE ALIMENTOS Y BEBIDAS-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA.
<p style="text-align: center;">Objetivo y campo de aplicación</p> <p>Esta Norma Mexicana establece las especificaciones para evaluar los procesos de descontaminación para el reciclado del polietileno tereftalato (PET) post-consumo provenientes incluso de usos diferentes al de grado alimenticio, que permitan obtener un material inocuo para envases que serán utilizados para el contenido de alimentos y bebidas.</p> <p>Esta Norma Mexicana es aplicable a todo el Territorio Nacional.</p>	
<p style="text-align: center;">Concordancia con Normas Internacionales</p> <p>Esta Norma Mexicana no es equivalente (NEQ) con ninguna Norma Internacional por no existir esta última al momento de su elaboración.</p>	
<p style="text-align: center;">Bibliografía</p> <ul style="list-style-type: none"> • U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES FOOD AND DRUG ADMINISTRATION CENTER FOR FOOD SAFETY AND APPLIED NUTRITION. "Guidance for industry- Preparation of Food Contact Notifications and Food Additive Petitions for Food Contact Substances: Chemistry Recommendations". (Consulta: 2016-12-06). Disponible en: http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/ucm081818.htm • U.S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION. Guidance for industry-Use of recycled plastics in food packaging: chemistry considerations. Commission Regulations (EC) No. 282/2008. (Consulta: 2016-12-06). Disponible en: http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/ucm120762.htm • EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. Scientific Opinion on the safety evaluation of the process "MOPET" used to recycle post-consumer PET into food contact materials. (Consulta: 2016-12-06). Disponible en: www.efsa.europa.eu/fr/efsajournal/pub/3094 	

4.3 Seguridad e higiene

Sea cual sea el uso final de las piezas plásticas producidas, es importante siempre mantener adecuadas medidas de seguridad e higiene que garanticen tanto la calidad del producto como el bienestar de las partes involucradas en el proceso. A su vez, las medidas de seguridad e higiene industriales ayudan a realizar cada paso de manera más eficiente al permitir encontrar áreas de oportunidad para cada paso, cada planta cuenta con su propio departamento de seguridad e higiene que trabaja de la mano directamente con operarios y responsables de proceso brindando apoyo en materia legal manteniéndose al día con las normas oficiales mexicanas que regulen el riesgo y manteniendo comunicación directa con los responsables del proceso para prever y evaluar posibles siniestros, así como proveer el equipo de protección personal requerido para el personal de acuerdo a la función que realice.



Equipo de protección personal (EPP).

Entre el equipo de protección personal requerido más comúnmente en la industria del reciclaje polimérico se encuentran:

Google: Reducen la probabilidad de que impurezas resultantes del proceso entren en contacto directo con los ojos.

Cofia: Reduce las impurezas en cabello y disminuye el riesgo de accidentes al evitar que el cabello resulte enredado con alguna parte móvil.

Guantes: Al manejar láminas punzocortantes en su mayor parte en la etapa de almacenamiento, es frecuente que se presenten lesiones menores como cortadas o quemaduras al contacto con plástico caliente, es por ello que el uso de guantes de protección reduce este tipo de siniestros.

Orejas: De acuerdo a la NOM-011-STPS se sugieren medidas para la exposición industrial al ruido tanto de tiempo, como de uso de EPP como orejas que ayudan a reducir el impacto auditivo de algunos equipos en el trabajo.

Bata: Permite la detección de sustancias ajenas al proceso o dañinas para la salud, cuando se habla de material polimérico de reciclaje el color sugerido es azul ya que permite una mayor distinción, a su vez también protege en primera instancia de afectaciones directas por solventes.

Botas de seguridad: La utilización de calzado adecuado en la industria reduce el riesgo de lesiones provocadas por choque eléctrico, caída de objetos pesados, o posibles caídas del personal.

CAPÍTULO 5

MANERAS ALTERNAS DE RECICLAJE DE PLÁSTICOS COMMODITIES.

“Quien no vive para servir, no sirve para vivir.”

Madre Teresa de Calcuta.

Además del reproceso planteado en el presente trabajo monográfico de actualización, los plásticos commodities pueden ser tratados por medios alternos tales como la reutilización que si bien no alcanzan cifras industriales, sí suman pequeños porcentajes en la reducción global de residuos plásticos otros medios aportan conocimiento científico destinado a generar las herramientas para encontrar nuevas y diferentes formas de gestión de dichos residuos como lo es el caso del reciclaje químico. Y formas alternas de evitar dichos residuos desde su salida de planta tal como lo plantea la iniciativa de ingeniería verde.

5.1 Reutilización



Es la forma más básica de reciclaje, radica esencialmente en dar uso nuevo a residuos plásticos después de su uso original.

Incentivar la reutilización de algunos polímeros como botellas de PET puede ayudar a reducir la contaminación por desechos plásticos en el medio ambiente, además se ha comprobado científicamente que las propiedades bromatológicas del PET y del vidrio son similares en tanto se mantenga una correcta higiene. [43]

La reutilización de plásticos commodities radica esencialmente en volverle a dar un uso idéntico a la pieza termoplástica, sin embargo, haciendo uso de la creatividad humana siempre es posible encontrar usos alternos que además de ayudar ecológicamente a nuestros ecosistemas, ayudan a economizar gastos en la vida cotidiana.

5.2 Incineración

Para algunos polímeros la incineración proporciona una alternativa consciente debido a que el calor generado durante la incineración se puede utilizar para generar vapor. Los hidrocarburos se queman bien y (con control y depuración apropiados) generan solo dióxido de carbono y agua como productos intermedios.

5.3 Reciclaje químico

Implica despolimerizar los plásticos y reducirlos hasta sustancias químicas sencillas. El objetivo es recuperar esos componentes químicos individuales para reusarlos como químicos o producir nuevos plásticos con las mismas características y propiedades de los materiales vírgenes.

La degradación de un polímero se define como la separación de enlaces entre las moléculas de las cadenas poliméricas, más específico, es causada principalmente por reacciones de separación de los enlaces químicos entre macromoléculas. [44]

Las posibles formas en que se puede degradar un polímero son:

- **Térmica:** largo tiempo de secado, largo tiempo de residencia en extrusor o inyectora,
- **Mecánica:** molienda, fricción en procesamiento
- **Biológica:** microorganismos
- **Química:** agentes hidrolíticos, hidrólisis

Debido a los altos costes, y el tiempo que representa el tratamiento de plásticos commodities por degradación, éste método no se encuentra entre los principales dentro de la industria para resolver el problema de contaminación global, sin embargo se encuentra en fase de investigación en constante crecimiento con el objetivo de incorporarse cada vez más y de una manera cada vez más práctica que además de la reducción de poluciones, permita la recuperación de materia prima útil para diversos procesos.

La despolimerización es una categoría especial de degradación, es el proceso que convierte el polímero en un monómero, en una mezcla de monómeros u oligómeros. La despolimerización es un proceso de descomposición de la cadena del polímero hasta sus monómeros u oligómeros. Por lo general se logra con alta temperatura (térmica) o agentes hidrolíticos (química).



Figura 9.0 Degradación polimérica.

5.31 Pirólisis

Comúnmente, la despolimerización térmica se clasifica como la reacción química en la que la cadena del polímero se convierte en monómeros a alta temperatura. La palabra pirólisis proviene del griego *piro*, 'fuego' y *lisis*, 'rotura' es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (y de cualquier halógeno). Involucra cambios simultáneos de composición química y estado físico, los cuales son irreversibles.[44]

La despolimerización ocurre durante la descomposición térmica del polimetilmetacrilato (PMMA), el poliestireno (PS) y algunas resinas del metacrilato. En general los polímeros generados por adición, se pueden despolimerizar por alta temperatura mientras que los polímeros de la condensación como son la poliamida (PA) y los poliésteres (PET, PBT) no despolimerizan térmicamente.

La despolimerización química consiste en que los compuestos químicos que contienen átomos de hidrógeno activo reaccionan con los grupos polares en las cadenas principales del polímero de condensación. Usualmente, esta reacción es una hidrólisis (ruptura enlaces de hidrógeno) ácida o básica de los enlaces en la amida, éster o uretano.

En general la pirolisis de los plásticos siguen rutas complejas que no pueden ser descritas por una o más reacciones químicas sino con fórmulas empíricas o sistemas de reacciones elementales que terminan por describir el proceso dadas ciertas condiciones a las que se lleva a cabo.

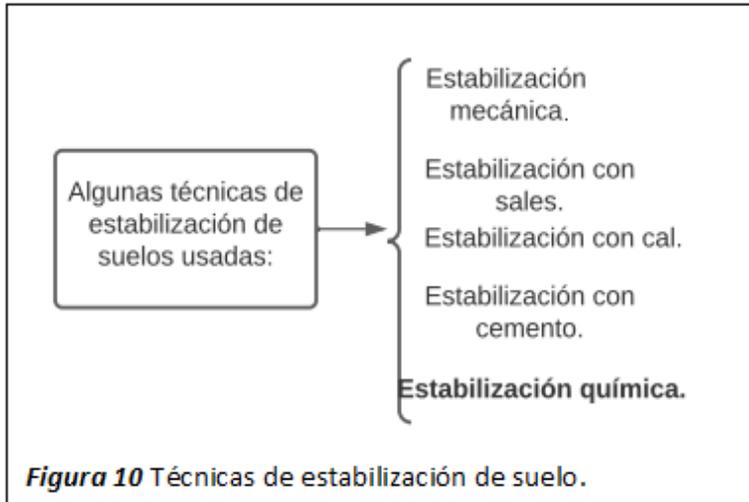
Las formas de descomposición se subdividen de acuerdo a los patrones de reacción presentes que cabe mencionar, están sujetos a la estructura química de la sustancia en cuestión y la presencia de catalizadores:

1. Descomposición o desdoblamiento hasta prevalencia de monómeros. Principalmente utilizada para el tratamiento de poliamida, y polimetilmetacrilato (PA, PMMA). Al tratarse de plástico de ingeniería, es de esperar que el coste sea elevado, por lo que las razones para su procesamiento resultan ser específicas. El metilmetacrilato (MMA) obtenido es frecuentemente utilizado como aceite lubricante, o reductor de viscosidad más que como monómero.
2. Fragmentación aleatoria de la cadena polimérica principal (PE,PP) en fragmentos de longitud variable intermedia. Así las poliolefinas se convierten en ceras de PE y aceites.
3. Descomposición combinando los dos casos anteriores (PS, PIB). En una planta de producción de poliestireno, sería conveniente reducir el poliestireno a sus monómeros solo si se cuenta con los medios para separar los diferentes productos resultantes de la pirolisis (estireno, etilbenceno, tolueno, benceno, etc.). Sin embargo esto no es posible para la mayoría de las compañías industriales.

4. Eliminación de moléculas simples y estables de átomos adyacentes (separando por ejemplo HCl del PVC).
5. Eliminación de las cadenas laterales. Este esquema es esencialmente seguido para su aplicación en termoestables y otros polímeros entrecruzados.

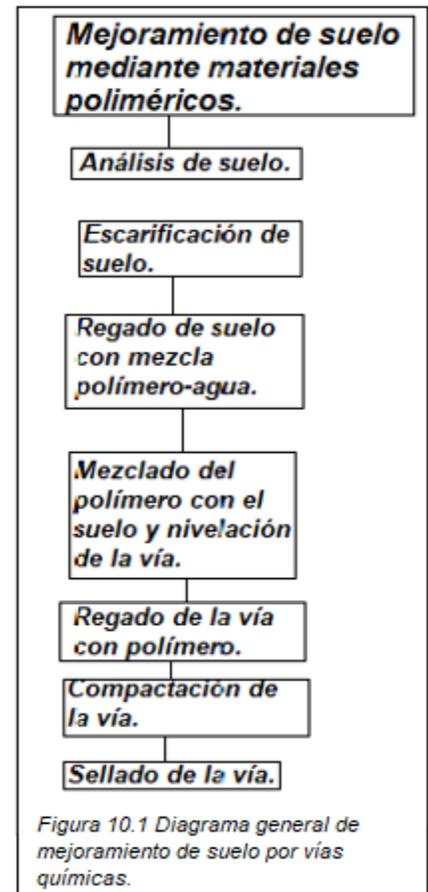
5.4 Terraplén

Se denomina Terraplén al proceso de relleno de suelo con la finalidad de aumentar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para la construcción o fines específicos.



Estabilización química.

Los polímeros pueden ser utilizados con la finalidad de dar estabilización a suelos, es decir que, a los suelos naturales de baja capacidad portante o susceptibles a cambios volumétricos es posible someterlos por medios mecánicos o químicos con la finalidad mejorar sus propiedades en cuanto a permeabilidad, compresibilidad, resistencia, estabilidad volumétrica, durabilidad, así como lograr un control de la erosión. El proceso consiste en mezclar homogéneamente materiales poliméricos con el suelo a tratar.



- El diseño de procesos debe incluir la relación de flujos de materia y energía involucrados, buscando siempre la mejora continua.

6. Proyección ciencia consciencia.

El nacimiento de la ciencia de polímeros ha traído consigo innumerables beneficios en diferentes campos donde el descubrimiento de nuevos materiales con propiedades específicas ha facilitado muchas de las tareas cotidianas del ser humano e impulsado el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Industrialmente se ha conseguido fabricar piezas provenientes de materiales poliméricos que además de reducciones importantes en los costos, han resultado notablemente superiores en durabilidad y funcionalidad. Es por ello que con la llegada de la industrialización, la demanda de productos a base de polímeros principalmente del tipo “commodity”, incrementó directamente proporcional, en la industria refresquera surgiendo así un problema de calidad mundial en cuanto al destino final de dichos productos, tales como botellas de plástico y embalajes en general pues de inicio fueron diseñados para ser de un solo uso y desecho sin hacer consideraciones pertinentes hacía el impacto ambiental dando como resultado cifras excesivas de material termoplástico principalmente PET depositado en océanos que alcanzan los 200kg de desecho por segundo.

Dado que resulta muy complicado reducir la demanda mundial de materiales poliméricos a nivel mundial y prácticamente imposible cuando se habla de la industria refresquera, es importante hacer un llamado que los profesionales responsables, y personas en general involucradas en la producción industrial del plástico, tomen conciencia acerca del tiempo de vida útil y posibles formas de desecho de los productos creados a nivel industrial y de ser posible, a partir de la etapa de laboratorio previa a la comercialización.

7.0 Observaciones finales

Cuando se habla de producto terminado a partir de material termoplástico reciclado, es de esperarse que posean una baja resistencia mecánica y por lo tanto una vida útil reducida. Debido a que un polímero no es un compuesto puro, resulta importante considerar las necesidades a cubrir comercialmente para la fabricación de nuevo producto ya que la calidad del producto será directamente proporcional a la materia prima utilizada, es decir que entre mayor sea la calidad del material polimérico utilizado, mayor será la calidad del producto final y esto repercutirá a su vez de manera directa en su precio.

El reciclaje de polímeros debe tener sustento económico, es decir que el costo de producción de los productos a base de plásticos reciclados deben ser menores al precio de fabricación utilizando materia prima nueva.

Las propiedades bromatológicas que se alcanzan con diversos materiales poliméricos aunado a bajos costos de producción, hacen de algunos plásticos commodity la mejor opción actual para embalaje de alimentos, siendo el PET en su mayoría la opción de mayor uso y versatilidad dejando un campo amplio de investigación para eficientar su proceso.

En resumen, las consideraciones centrales que se siguen para la utilización de material polimérico de reciclaje en nuevos productos son la vasta disponibilidad que tienen, sus propiedades químicas y mecánicas, la versatilidad de su procesamiento, la funcionalidad, y el impacto ambiental que se busca contrarrestar mediante las buenas prácticas de reciclaje.

Al ser una ciencia joven y de gran demanda por su utilidad práctica, la ciencia de polímeros proyecta un gran potencial en las diferentes áreas requeridas para la humanidad, ya sea en el desarrollo de nuevos materiales para alta ingeniería o comercialización de polímeros de uso común debido a la creciente demanda industrial; sin embargo es preciso mencionar que al igual que en el desarrollo de otros materiales, el profesionista, empresario, y personal técnico involucrado, tiene la responsabilidad implícita de prever el correcto manejo y desecho del producto fabricado así como ejecutar el pertinente análisis de impacto ambiental que puede resultar de su comercialización.

Referencias

- [1] Polymer Chemistry/Malcom P. Stevens 1999.
[Figuras 1-1.2] unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution
- [2] <https://es.wikipedia.org/wiki/Plástico>.
- [3] unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution.
- [4] <https://ecologiahoy.net/medio-ambiente/cuales-son-los-paises-del-mundo-que-mas-reciclan/>
- [5] <https://www.bardahlindustria.com/la-industria-del-plastico>.
- [6] Introduction to physical polymer science L.H. Sperling, 4th edit. John Wiley, Inc. 2006
- [7] Polymer Chemistry/Malcom P. Stevens' 1999 p.p 25.
- [8] Hidrogenación catalítica homogénea de copolímeros lineales y en forma de estrella sobre su microestructura y comportamiento térmico/ R. Martínez 2007P.P9.
- [9] Fundamental Principles of Polymeric Materials, Third Edition. Christopher S. Brazel and Stephen L. Rosen. John Wiley & Sons, Inc. Published 2012 Pag. 91.
- [10] Fundamental Principles of Polymeric Materials, Third Edition. Christopher S. Brazel and Stephen L. Rosen. John Wiley & Sons, Inc. Published 2012 Pag. 92.
- [11] Fundamental Principles of Polymeric Materials, Third Edition. Christopher S. Brazel and Stephen L. Rosen. John Wiley & Sons, Inc. Published 2012 Pag 101.
- [12] Giant molecules/2nd edition/Charles E. Carraher Jr. 2003.
- [13] Polymer Chemistry/Malcom P. Stevens 1999 p.p 30.
- [14] <https://www.forbes.com.mx/consumo-de-resinas-en-mexico-supera-6-millones-de-toneladas-en-2020-anipac/>
- [15] Policloruro de vinilo - PVC | Textos Científicos (textoscientificos.com).
- [16] Confederación Española de Empresarios de Plásticos y CEP, Centro Español de Plásticos, ed. (1991). Los plásticos: materiales de nuestro tiempo. (1^a edición). Barcelona, España. pp. 34-53. B-25033-91.
- [17] Policloruro de vinilo: historia, estructura, propiedades, usos (lifeder.com).
- [18] <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/01/13/economia/en-2021-mexico-reciclo-mas-de-1-millon-de-toneladas-de-plastico-anpac/>

- [19] <https://www.forbes.com.mx/mexico-es-autosuficiente-en-produccion-de-pvc-anipac/>
- [20] http://biblioteca.anipac.mx/wpcontent/uploads/2016/10/0044_Post_Consume_-_Plastics_Recycling_in_Canada_2012.pdf
- [21] <https://aniq.org.mx/anuario/2019/Capitulo10/polietilenos-de-baja-densidad.html>
- [22] Reciclado de Polímeros - Polímeros y Cerámicos (weebly.com).
- [23] [26] ARLIE, J.P. (1990). Commodity Thermoplastics. Paris: Editions Technip.
- [24] <https://www.infobae.com/america/mexico/2019/12/24>.
- [25] Misma referencia que en página 37: <https://www.forbes.com.mx/consumo-de-resinas-en-mexico-supera-6-millones-de-toneladas-en-2020-anipac/>
- [26] Y también <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/01/13/economia/en-2021-mexico-reciclo-mas-de-1-millon-de-toneladas-de-plastico-anpac/>
- [27] <https://www.indelpro.com/webapp/acerca.html>
- [28] NICHOLSON, J.W. (2006). The Chemistry of Polymers, 3rd ed.
- [29] SCHEIRS, John y PRIDDY, Duane (editores) (2003), Modern Styrenic Polymers, Wiley. 0-471-49752-5.
- [30] GRASSI, Vinicius G. y otros: «Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto», en Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 11, N° n°3. pág. 158-168.
- [31] <https://www.plastico.com/temas/Mexico-construye-una-industria-del-reciclaje-de-EPS+125381>
- [32] Silva Rodríguez, Francisco; José Emilio Sanz Aragonés (1997).. Los plásticos. Tecnología industrial I (1ª edición). Aravaca (Madrid, España): McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. pp. 164-174.
- [33] BIRON, Michel (1998). Propriétés des thermoplastiques. Techniques de l'Ingénieur.
- [34] cienciadelosmateriales.weebly.com/reciclado-de-poliacutemeros.

[35] Extrusión de plásticos, principios básicos. Ramos. Editorial Limusa 2002 p.p 69.

[36] <https://prezi.com/gj6qqcmcfbpg/proceso-de-espumado>.

[37] <https://www.mexpolimeros.com/espumado.html>

[38] Recubrimientos Plásticos para Cables|Ginés García.

[39] <https://www.topcable.com/blog-electric-cable/recubrimientos-cables-electricos>.

[40] Introduction to polymer science and technology/Mustafa Akay 2012.

[41] Gestión de la Calidad: Conceptos, enfoques, modelos y sistemas (unam.mx).

[42] Administración y control de calidad. 9a Ed. James R. Evans y William M. pp.3

[43] bbc.com/mundo/noticias/2015/10/150930_salud_es_seguro_reutilizar_botellas_plastico_ig.

[44] <https://todoenpolimeros.com/2016/11/23/degradacion-y-despolimerizacion>.

[45] Estudio del tratamiento y degradación de los desechos plásticos y tendencias no convencionales de revalorización/Laura González Cruz México 2020.

[46] Giant molecules/2nd edition/Charles E. Carraher Jr. 2003.

[47] Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. A. Buekens. Brussels, Belgium pp. 11

ANEXO I

REGLAMENTO DE LA LEY DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO FEDERAL
Publicado en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 07 de octubre de 2008

Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 19 de febrero de 2020

CAPÍTULO V DE LA SEPARACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Artículo 32. Los residuos sólidos urbanos deberán separarse y clasificarse conforme a la normatividad aplicable vigente.⁹⁷

Previendo siempre lo dispuesto en la normatividad aplicable, la subclasificación de los residuos orgánicos podrá efectuarse conforme a lo siguiente:⁹⁸

I. Residuos de jardinería y los provenientes de poda de árboles y áreas verdes;

II. Residuos provenientes de la preparación y consumo de alimentos;

III. Residuos susceptibles de ser utilizados como insumo en la producción de composta;

IV. Residuos plásticos que por sus características sean considerados compostables.⁹⁹

V. Los demás que establezcan en forma conjunta la Secretaría y la Secretaría de

Obras.¹⁰⁰

Previendo siempre lo dispuesto en la normatividad aplicable, los residuos inorgánicos podrán subclasificarse en:¹⁰¹

I. Vidrio;

II. Papel y cartón;

III. Plásticos;

IV. Aluminio y otros metales no peligrosos y laminados de materiales reciclables;

96 Reforma publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

97 Reforma publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

98 Reforma publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

99 Reforma publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

100 Adición publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

101 Reforma publicada en la GOCDMX el 02 de enero de 2020

A N E X O II

Acopio de PET en México, el más alto de América			
	2012	2013	2014
Cosumo Aparente Nacional de PET virgen para envases	715	710	700
Asociados de ECOCE representan el 64% de este total	64%	64%	64%
Total PET enviado al mercado por asociados	460	457	448
Resina reciclada post-consumo PCR		54	76
Total RECUPERADO como País	414	428	405
	57.9%	60.3%	57.8%
PET que se va a Disposición Final (Potencial recuperación)	42.0%	39.6%	42.1%
Disperso en el medio ambiente (contaminación visual)	0.1%	0.1%	0.1%
De lo acopiado en México se valoriza y comercializa:			
Reciclado Nacional	38%	38%	46.2%
Reciclado EXPORTACIÓN (China, EE.UU. y otros)	62%	62%	53.8%

Fuente: ECOCE.

Fuente: Plastics Technologies México.

<https://www.pt-mexico.com/articulos/el-reciclaje-de-pet-en-mexico-es-caso-de-exito>

Consulta: Abril 13, 2022.