



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

RESIDUOS PLÁSTICOS

Apellidos y nombre: Velázquez Martí, Borja (borvemar@dmta.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Universitat Politècnica de València

Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	3
4. Clasificación de los plásticos	3
4.1. Plásticos Termoestables	3
4.2. Termoplásticos	4
5. Estrategias de eliminación de los plásticos	4
5.1. Tratamiento final de residuos plásticos termoestables	4
5.2. Tratamiento final de residuos termoplásticos	6
6. Separación de los distintos tipos de residuos plásticos	7
7. Cierre	9
8. Ejercicio propuesto	10
9. Bibliografía	10

1 Resumen de las ideas clave

La gestión y el tratamiento de los plásticos es un proceso importante para reducir la contaminación ambiental y conservar los recursos como el petróleo. Éstos se clasifican en dos categorías principales en función de su comportamiento a la temperatura: plásticos termoestables y termoplásticos. Los termoplásticos son polímeros que pueden ser fundidos y moldeados repetidamente mediante la aplicación de calor. Los termoestables son polímeros que, una vez moldeados y endurecidos no pueden ser fundidos ni moldeados nuevamente mediante el calentamiento. Debido a las distintas propiedades de los materiales de cada grupo, la separación en origen, o en su defecto su clasificación posterior adquieren suma importancia para la eficiencia de los tratamientos finales. Los tratamientos principales se basan en la incineración, tratamiento térmico tal como el craqueo catalítico, la pirólisis o gasificación), la despolimerización química, reutilización, reciclaje mediante refundido y moldeado (termoplásticos). En este artículo se describirán las alternativas existentes para la correcta gestión de estos residuos.

Si estás listo, empezamos...

2 Introducción

Los plásticos son polímeros orgánicos de alto peso molecular. Usualmente son sintetizados en su mayoría a partir del petróleo. Aunque hay derivados del almidón o la celulosa, tales como el ácido poliláctico

Cuando el petróleo es extraído es sometido a un tratamiento de craqueo. El craqueo o cracking es un proceso químico por el cual se quiebran las moléculas de un compuesto produciendo compuestos más simples. Se puede seguir un craqueo térmico o catalítico. El «craqueo térmico» emplea calor y presión (7 MPa) a una temperatura entre 800 y 850°C. El «craqueo catalítico» se realiza a una temperatura menor de entre 450 y 500°C, utilizando un catalizador. Del craqueo se obtiene una mezcla de hidrocarburos, los cuales se separan mediante destilación fraccionada. De la destilación se obtienen monómeros los cuales pasan a un proceso de polimerización, para obtener materias estables y con determinadas propiedades útiles para la industria.

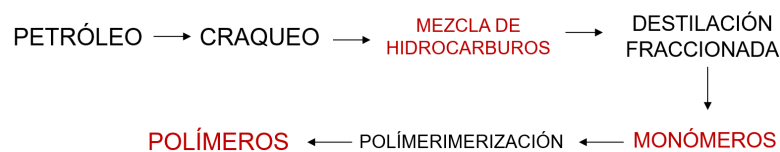
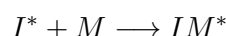


Figura 1: Proceso de obtención de plásticos

El proceso de polimerización tiene tres etapas: iniciación, propagación y terminación.

Iniciación de la polimerización

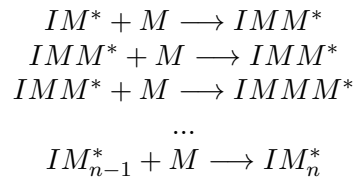
Para que el proceso se inicie es necesario que aparezcan especies activas reaccionantes. Para que las moléculas se activen es necesaria alguna molécula distinta a los monómeros (M), a esta molécula inicial se le denomina iniciador (I*). El iniciador se combina con el monómero de tal manera que lo activa, y le hace susceptible a enlazarse con otros monómeros.



Esta fase es cinéticamente más lenta que la propagación y terminación por lo que es la que limita el tiempo de reacción.

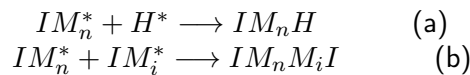
Fase de propagación

En la fase de propagación el monómero activado reacciona con otros monómeros que pasan a alargar la cadena.



Fase de terminación

La terminación se puede producir por dos mecanismos: bien por la captación de un hidrógeno que provoca la desactivación del radical (a), o bien por el choque de dos cadenas activas formando una más larga (b).



Los iniciadores catalizadores del proceso Fischer-Tropsch son metales como el Ni, Co y Fe sobre sílice, trabajando con temperaturas entre 250 y 450°C (dependiendo del catalizador utilizado), y presiones de 15 a 40 bar. Alrededor de un 90 % de los polímeros formados tienen entre 10 y 20 carbonos, pasando a líquido.

3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de describir el proceso de gestión y tratamiento de los residuos plásticos, proponiendo soluciones a los problemas asociados a las distintas operaciones.

4 Clasificación de los plásticos

Los plásticos se pueden clasificar en dos categorías principales: termoestables y termoplásticos. Estas categorías se diferencian por su comportamiento ante el calor y la forma en que responden a los procesos de moldeo y reciclaje.

4.1 Plásticos Termoestables

Los plásticos termoestables son polímeros que, una vez moldeados y endurecidos, no pueden fundirse ni deformarse mediante el calor sin descomponerse. Durante su fabricación estos plásticos experimentan una reacción química que forma enlaces cruzados, creando una estructura tridimensional. Este proceso irreversible les confiere estabilidad térmica y dimensional. Los plásticos termoestables no se derriten cuando se calientan, ya que su estructura no permite el flujo plástico. En cambio, se descomponen a temperaturas elevadas.

Se utilizan en aplicaciones donde la estabilidad dimensional y la resistencia térmica son críticas, como en la fabricación de componentes eléctricos, aisladores, piezas de automóviles y productos de alta resistencia química.

Los plásticos termoestables más comunes serían: politetrafluoroetileno (PTFE), más conocido como teflón, poliuretano, caucho, silicona, melamina, resinas epoxi, poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP).

4.2 Termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros que se pueden fundir repetidamente cuando se calientan y solidificar cuando se enfrían, manteniendo sus propiedades químicas. Estos plásticos se fabrican mediante la fusión y extrusión de resinas termoplásticas, sin formar enlaces cruzados permanentes. A diferencia de los termoestables, los termoplásticos se ablandan y pueden moldearse cuando se calientan, y se endurecen nuevamente al enfriarse. Este proceso es reversible y se puede repetir. Son especialmente apreciados por su capacidad para ser reciclados y remodelados.

Los termoplásticos se clasifican según el tipo de resina con un número de reciclaje del 1 al 7, conocido como el código de identificación de resina. Este código ayuda a identificar el tipo de plástico y facilita su separación.

Termoplásticos







Sistemas de Códigos de Identificación de Resinas (RIC)							
Tipo de plástico:	Polietileno Tereftalato	Polietileno de alta densidad	Policloruro de vinilo	Polietileno de baja densidad	Polipropileno	Poliestireno	Otros
Sigla	PET (también PETE)	HDPE (tb. PEHD o PEAD)	PVC	LDPE (tb. PEBD o PEBD)	PP	PS	Otros
Código	 PET	 PE-HD	 PVC	 PE-LD	 PP	 PS	7

Figura 2: Proceso de obtención de plásticos

5 Estrategias de eliminación de los plásticos

5.1 Tratamiento final de residuos plásticos termoestables

La dificultad de recuperación de las propiedades de los plásticos termoestables hace que para su eliminación se busquen las siguientes alternativas:

- Incineración

La incineración de residuos plásticos termoestables reduce significativamente su volumen, ya que los convierte en cenizas y gases, liberando grandes cantidades de calor aprovechable en un ciclo de Rankine. Es por ello una estrategia común para la gestión de estos materiales, aunque presenta ciertos desafíos y consideraciones. La incineración implica la combustión controlada a temperaturas muy elevadas, generalmente en el rango de 800 a 1200 grados Celsius. A estas temperaturas, los plásticos termoestables se descomponen y queman, generando agua, CO₂ y calor. Si la temperatura es menor, existe el riesgo de producir emisiones tóxicas a la atmósfera. Además estos materiales suelen estar tratados con aditivos que los hacen poco inflamables

y poco combustibles lo que obliga a aplicar una elevada energía de ignición con ayuda de otra fuente de calor, así como para mantener el proceso en el horno. Esto reduce la eficiencia energética del proceso

La posible liberación de sustancias tóxicas obliga a la aplicación de tecnologías de control de la contaminación para minimizar estos impactos. Por otro lado, la incineración genera residuos en forma de cenizas que pueden contener algunos elementos no quemados, metales pesados u otros contaminantes, y requieren una gestión adecuada.

- Gasificación

Los residuos plásticos se someten a altas temperaturas en un ambiente controlado y en ausencia de oxígeno para producir gas de síntesis y coque. Luego, el gas de síntesis se puede convertir en productos químicos y combustibles.

- Pirólisis

Similar a la gasificación, pero a temperaturas más moderadas (400-800 grados Celsius) y sin oxígeno. Los residuos plásticos se descomponen en productos líquidos y gaseosos. La pirólisis puede producir productos útiles, como aceites pirolíticos y gas, que pueden tener aplicaciones como combustibles o materias primas para la industria química.

- Despolimerización química

La despolimerización de residuos plásticos es un proceso que descompone las grandes cadenas de polímeros en monómeros o productos químicos básicos. Este enfoque busca revertir el proceso de polimerización y recuperar los componentes originales de los plásticos, permitiendo su reutilización o transformación en nuevos productos.

Distintos caminos para la despolimerización química serían:

- Hidrólisis ácida o básica: Consiste en someter los plásticos a tratamiento con ácidos o bases fuertes en presencia de agua. Los enlaces químicos en los polímeros se rompen, generando productos más simples.

- Craqueo térmico catalizado: En este método, los polímeros se descomponen térmicamente a temperaturas por encima de 400 grados Celsius en presencia de un catalizador, produciendo monómeros y otros productos gaseosos. La despolimerización catalítica utiliza catalizadores para acelerar la ruptura de los enlaces poliméricos. Puede llevarse a cabo en condiciones más suaves en comparación con la hidrólisis tradicional. Los catalizadores a menudo se pueden recuperar y reutilizar.

- Despolimerización iónica: implica la aplicación de iones para romper los enlaces poliméricos. Este método puede ser utilizado para descomponer plásticos específicos en condiciones controladas.

- Despolimerización por solvólisis: Implica la aplicación de disolventes específicos para descomponer los plásticos en solución. La solvólisis puede ser térmica o catalizada.

- Despolimerización biológica

Se utilizan microorganismos o enzimas para descomponer los polímeros en componentes más simples. Este método puede ser más lento y requiere condiciones específicas para optimizar la actividad biológica.

- Despolimerización por microondas

Se aplican microondas para calentar selectivamente los residuos plásticos y descomponerlos en monómeros. Este método puede ser más eficiente energéticamente en comparación con procesos térmicos convencionales.

- Reutilización

Los residuos plásticos termoestables pueden ser destinados a relleno de terrenos como elementos inertes o vertederos, o utilizarse en la fabricación de elementos constructivos como paneles, aislamientos, pavimentos a través de su mezcla con otras resinas.



(a) Soletas de caucho



(b) Soletas de caucho en parques infantiles

Figura 3: Reutilización del caucho

Reflexiona y emite un juicio personal sobre quien debe hacerse cargo es estos procesos...

5.2 Tratamiento final de residuos termoplásticos

Además de las opciones anteriores, los residuos termoplásticos permiten la fundición y modelado repetidamente. Esto permite el reciclaje continuo manteniendo las propiedades físicas de los materiales. El único problema asociado viene vinculado a que en múltiples ocasiones los distintos residuos se encuentran mezclados, lo que impide la obtención de productos puros con propiedades más deficientes

Tras la recolección, los plásticos se clasifican según el tipo de resina. Posteriormente se lavan para eliminar contaminantes. Este paso es crucial para garantizar la calidad del material reciclado. Los plásticos limpios se muelen en pequeños trozos, conocidos como escamas. Este proceso facilita la fusión y el reprocesamiento. Las escamas de plástico se funden y se pueden convertir en gránulos mediante un proceso de extrusión. Estos gránulos se pueden utilizar para fabricar nuevos productos de plástico. Los gránulos reciclados se utilizan en la fabricación de una variedad de productos. Estos productos reciclados contribuyen a reducir la demanda de plástico virgen y minimizan el impacto ambiental.

6 Separación de los distintos tipos de residuos plásticos

El coste y calidad del tratamiento de los residuos plásticos está directamente vinculado a la homogeneidad de los materiales. La heterogeneidad dificulta enormemente los distintos tipos de procesos. Es por tanto que la separación de distintos tipos de plásticos en origen es un paso esencial para la viabilidad del proceso. Si la separación en origen no es posible o se realiza de forma muy deficiente, es necesario aplicar tecnologías de mayor o menor eficacia de separación. La combinación de varios métodos a menudo se utiliza para lograr una separación más eficiente.

Existen varias razones por las que es necesaria la separación de los diferentes tipos de plásticos

- Temperatura de transición vítrea distinta.
- Temperatura de fusión distinta.
- Productos de fusión distintos lo que implica distinta fluidez.
- Temperatura distinta de solidificación.
- Temperatura distinta de combustión.
- Gases de combustión distinta.
- Temperatura y catalizador de despolimerización distintos.

Los procesos seguidos generalmente para la separación de los residuos plásticos son los siguientes:

Identificación y clasificación manual

Los trabajadores en instalaciones de reciclaje pueden realizar la clasificación manual de los plásticos basándose en códigos de identificación (números del 1 al 7) que se encuentran en la mayoría de los envases plásticos. Sin embargo, este método puede ser laborioso y propenso a errores.

Por otra parte, los distintos tipos de plásticos se utilizan para objetos específicos lo que permite a los operarios identificar y clasificar los plásticos visualmente en función de su apariencia y características visuales.



Figura 4: Proceso de clasificación manual de plásticos

Uso de imágenes

Del mismo modo que en la clasificación manual, a través de imágenes se pueden identificar objetos específicos que se conoce que son fabricados con los distintos tipos de plásticos. Esto permite identificar y clasificar los plásticos automáticamente y utilizar posteriormente sistemas automáticos o robotizados de separación. ([Materiales plásticos](#))

Separación por hundimiento/flotación

El método de hundimiento/flotación, basado en las diferencias de densidad, es una técnica eficaz para separar una mezcla de termoplásticos como HDPE, LDPE, PP, PS y PVC. La ligera variación en la densidad de estos compuestos es suficiente para lograr resultados satisfactorios con este sistema.

Tabla 1: Propiedades de los termoplásticos

	PP	LDPE	HDPE	PS	PVC	PET	Teflón
Densidad (kg/m ³)	900	920	940	1050	1380	1390	2200
Temperatura transición vítrea (°C)	-20	-120	-90	100		75	
Punto de fusión (°C)	175	100-230	205-300	190-280	150-260	230-260	
Calor latente de fusión (kJ/kg)			178,6				
Conductividad térmica (W/m ² C)			0,44	0,12	0,12-0,25	0,24	
Calor específico (sólido) (kJ/kg.K)	2,30		1,33 a 2,40	1,25	0,9	1	
Temperatura de ignición (°C)			340	290	400		
Poder Calorífico (MJ/kg)	75-85				80-85	85-90	

El procedimiento implica la introducción de la mezcla de plásticos (previamente molidos) en agua que contiene una pequeña cantidad de tensoactivos. Los tensoactivos disminuyen la tensión superficial del agua, lo que hace que se reduzca la fuerza de rozamiento entre las partículas de agua y la superficie de los plásticos, lo que facilita el hundimiento de las partículas de mayor densidad que el agua. Entonces el PP, HDPE y LDPE flotan en la superficie, mientras que el PS y el PVC se hunden en el fondo.

La fracción que flota en la superficie se traslada a una mezcla de menor densidad que el agua, específicamente una mezcla de agua y alcohol. De esta manera, el HDPE se hunde, y el PP y el LDPE permanecen en la superficie.

Un proceso similar se lleva a cabo con la mezcla de PS y PVC, separándolos mediante una solución de agua salina.

Con este método, se logra obtener separaciones del 95 %.

Separación por técnicas de flotación por aire

Se utiliza para separar plásticos de diferente densidad previamente molidos utilizando corrientes de aire para separar los plásticos más ligeros de los más pesados.

Separación por fuerza centrífuga

Para la separación de residuos plásticos triturados o molidos se puede usar un hidrociclón con forma cónica, donde un flujo de agua que arrastra las partículas plásticas es obligado a girar a elevada velocidad. Entonces la fuerza centrífuga lanza las partículas más densas de forma tangencial hacia la parte exterior del cono, cayendo a la parte interior las partículas más ligeras.

Separación según reflectancia/absorbancia

Previamente a la trituración, se utilizan sensores ópticos para detectar diferentes tipos de plásticos según sus propiedades reflectantes o absorbentes de radiación a determinadas longitudes de onda. Una radiación bastante utilizada es la banda del infrarrojo. Tras la detección del tipo de plástico por estos sensores se diseñan sistemas de separación automática.

Separación electrostática

Se basa en las diferentes propiedades eléctricas de los plásticos triturados. Cuando se cargan eléctricamente, los plásticos pueden ser separados por fuerzas electrostáticas.

Disolución en disolventes

Este procedimiento está basado en la solubilidad de los plásticos HDPE, LDPE, PP, PS Y PVC en distintos disolventes, consiguiéndose purezas que oscilan alrededor del 95 %. En la Figura 5 se proporciona un esquema del proceso.

La velocidad a la cual la solución puede formarse depende del tamaño molecular, la capacidad del solvente y de la temperatura.

Tabla 2: Disolventes de distintos termoplásticos

Plásticos	Solventes
Poliétileno (PE)	A temperatura de 100-110°C. Tolueno o xileno, o en disolventes clorados tales como tricloroetano o triclorobenceno.
Poliestireno (PS)	Acetona
Policloruro de vinilo (PVC)	Ciclohexanona y tetrahidrofurano.

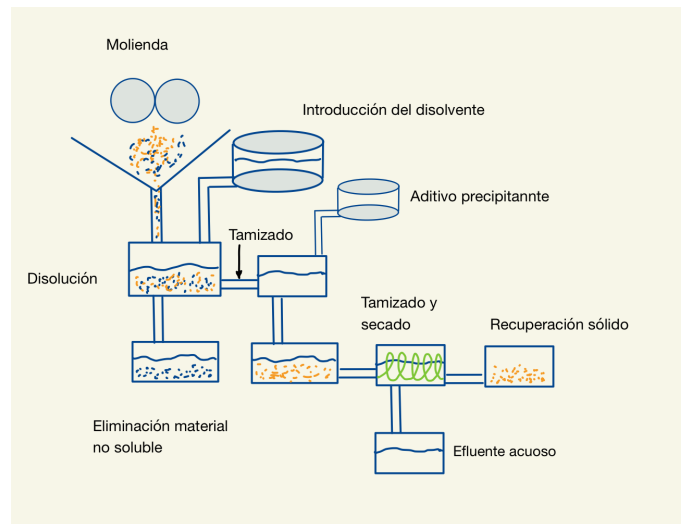


Figura 5: Separación de plásticos mediante disolventes

En todos los casos la recuperación del polímero se hace por precipitación mediante un agente precipitante.

7 Cierre

Como se ha podido comprobar, el tratamiento de los residuos de plásticos supone una problemática muy seria por su volumen y dificultad de tratamiento. La principal diferencia entre termoestables y termoplásticos radica en la capacidad de fusión y remodelación. En la Figura 5 se esquematizan los posibles tratamientos generales. La diversidad de materiales provoca que existan muchas variantes de tratamiento. Cada opción a su vez provoca una serie de residuos de segunda generación, tales como lodos, que es necesario también considerar en la propuesta de gestión.

Además de la toxicidad de los lodos, los procesos conllevan la emisión de gases con posibles riesgos para la salud, por lo que deben considerarse también las medidas de prevención correspondientes.

El tratamiento general de los termoplásticos comienza en la recolección. Éstos pueden provenir de contenedores de reciclaje, programas de recolección de residuo, o instalaciones de reciclaje especializadas. Después de la recolección, los plásticos se clasifican según el tipo de resina. Los plásticos están etiquetados con un número de reciclaje del 1 al 7, conocido como el código de identificación de resina. Este código ayuda a identificar el tipo de plástico y facilita su clasificación. Los plásticos recolectados se lavan para eliminar residuos y contaminantes. Este paso es crucial para garantizar la calidad del material reciclado. Los plásticos limpios se muelen

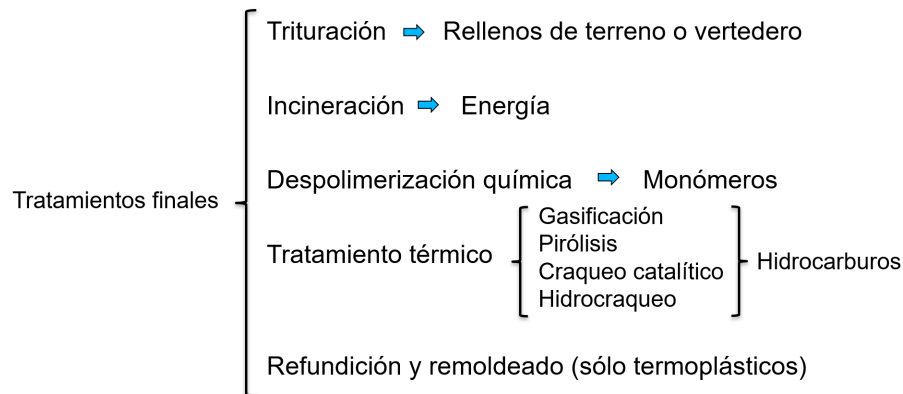


Figura 6: Recopilación de las técnicas de tratamientos finales de plásticos

en pequeños trozos, conocidos como escamas. Las escamas de plástico se funden y se pueden convertir en gránulos mediante un proceso de extrusión. Estos gránulos se pueden utilizar para fabricar nuevos productos de plástico. Los gránulos reciclados se utilizan en la fabricación de una variedad de productos, como botellas, contenedores, textiles, juguetes y más. Estos productos reciclados contribuyen a reducir la demanda de plástico virgen y minimizan el impacto ambiental. Es importante destacar que no todos los plásticos son iguales, y algunos son más difíciles de reciclar que otros. Además, el reciclaje del plástico tiene sus limitaciones, ya que algunos plásticos pueden degradarse en calidad durante el proceso. Por lo tanto, es fundamental fomentar el uso responsable de plásticos, reducir la generación de residuos y promover alternativas sostenibles. Además, la conciencia pública sobre el reciclaje y la participación activa en programas de reciclaje son esenciales para el éxito de estas iniciativas.

8 Ejercicio propuesto

Selecciona una industria agroalimentaria e identifica los puntos del proceso de producción donde se generan residuos plásticos, investiga de que tipo son, y propón un sistema de gestión integrado en la empresa.

Si has propuesto las fases elementales ¡Objetivo conseguido!

9 Bibliografía

Elias X.(2009) Reciclaje de residuos industriales. 2ª Ed. Ed. Diaz de Santos. 1320pp. ISBN: 978-8479788353

Richardson L. (1999) Industria del plástico. Ed. Paraninfo. 600pp. ISBN: 978-842832569

Driver W.E. (1982) Química y tecnología de los plásticos. Compañía Editorial Continental. ISBN: 978-9682603464

Beltrán Rico M., Marcilla Gomis A.(2012) Tecnología de polímeros. Procesado y Propiedades. Ed. Universidad de Alicante. Servicio de publicaciones. 276pp. ISBN: 978-8497172325